

# PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN BASADO EN LUZ VISIBLE

SEBASTIÁN CABALLERO BARRAGÁN

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
ÁREA DE TELECOMUNICACIONES  
SANTIAGO DE CALI  
2018

# PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN BASADO EN LUZ VISIBLE

SEBASTIÁN CABALLERO BARRAGÁN

Código: 1227003

Trabajo de grado  
Para optar al título de  
Ingeniero Electrónico

DIRECTOR

Ing. FABIO GERMAN GUERRERO M.sC

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
ÁREA DE TELECOMUNICACIONES  
SANTIAGO DE CALI  
2018

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Ing. Fabio German Guerrero. M.sc.

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Santiago de Cali, 20 de abril del año 2018

## **Dedicatoria**

A la memoria de mi abuela materna, aunque se haya ido pronto y no pudo ver el resultado final de todos los días de esfuerzo y dedicación en este largo recorrido, sé que desde la distancia infinita que nos separa, ella se siente orgullosa de lo que he logrado, tal y como lo estuvo siempre en vida por cada uno de mis logros.

## **Agradecimientos**

A mis padres y familiares por todo el amor, apoyo y confianza brindada durante mi proceso de formación como profesional.

A mi compañera sentimental, Angela Obando, quien sin su constante motivación no habría podido encontrar el camino en esos momentos en que este parecía tan difícil de encontrar.

A mis amigos incondicionales Jairo Noguera y Andrés Holguín, por brindarme su total apoyo durante el desarrollo de este trabajo de grado en cada uno de los momentos que fue necesario.

Al profesor Fabio Guerrero, por su orientación y apoyo incondicional en el desarrollo del proyecto.

Finalmente, a la Universidad del Valle, principalmente a la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, cuyos profesores me brindaron la formación necesaria para convertirme en un profesional, mostrándome que el camino no es fácil, pero es posible llegar a la meta con el esfuerzo y la dedicación necesaria.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	13
1. MARCO REFERENCIAL .....	15
1.1 CONCEPTOS BÁSICOS.....	15
1.2 COMUNICACIÓN BASADA EN LUZ VISIBLE LIMITACIONES, VENTAJAS Y DESVENTAJAS .....	17
1.2.1 Transmisión de la información en los sistemas VLC .....	17
1.2.2 Descripción del canal en sistemas VLC .....	21
1.2.3 Recepción de la información en sistemas VLC .....	22
1.2.4 Ventajas y desventajas de la tecnología VLC .....	22
1.2.5 Limitaciones en los sistemas VLC .....	23
1.3 ESTÁNDAR IEEE 802.15.7.....	25
1.3.1 Alcance del estándar .....	25
1.3.2 Propósito del estándar.....	25
1.3.3 Topologías de red propuestas en el estándar IEEE 802.15.7 .....	26
1.3.4 Capa física según el estándar IEEE 802.15.7 .....	26
1.3.4 Dimming y mitigación del flicker .....	27
1.4 APLICACIONES DE LAS COMUNICACIONES BASADAS EN LUZ VISIBLE Y ALGUNOS EJEMPLOS .....	28
1.4.1 Aplicaciones en interiores.....	28
1.4.2 Aplicaciones en exteriores.....	29
1.4.3 Ejemplos de aplicación de la tecnología VLC.....	29
2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO .....	32
2.1 ESQUEMA GENERAL DEL PROTOTIPO A DESAROLLAR .....	32
2.2 MÓDULOS VLC DEL PROTOTIPO .....	33
2.2.1 Etapa de alimentación eléctrica.....	33
2.2.2 Etapa de transmisión.....	34
2.2.3 Etapa de recepción.....	37
2.2.4 Etapa de procesamiento.....	38
2.3 DISEÑO HARDWARE Y SOFTWARE DEL PROTOTIPO .....	40

2.3.1	Diseño hardware de la etapa de transmisión de los módulos VLC .....	40
2.3.2	Diseño hardware de la etapa de recepción de los módulos VLC .....	42
2.3.3	Diseño de software de la etapa de transmisión.....	45
2.3.4	Diseño de software de la etapa de recepción.....	47
2.4	IMPLEMENTACIÓN FINAL DEL PROTOTIPO .....	50
3.	VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO Y PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN .....	53
3.1	PRUEBAS DE VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO.....	53
3.1.1	Validación del sistema de comunicación en modo simplex .....	54
3.1.2	Validación del sistema de comunicación en modo half-duplex.....	57
3.2	DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO. ....	61
3.2.1.	Configuración de los módulos VLC .....	61
3.2.2	Tasa de transmisión vs distancia entre los módulos .....	62
3.2.3	Tasa de transmisión vs niveles de iluminación ambiente .....	62
3.2.4	Distancia entre los módulos vs potencia de transmisión .....	64
3.2.5	Prueba de funcionamiento sin lente óptico.....	65
3.2.6	Tasa de error de bit .....	65
4.	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	67
4.1.	TASA DE TRANSMISIÓN VS DISTANCIA .....	67
4.2.	TASA DE TRANSMISIÓN VS NIVELES DE ILUMINACIÓN .....	68
4.3	DISTANCIA INTER-MÓDULO VS POTENCIA DE TRANSMISIÓN .....	69
4.4	COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA SINLENTE ÓPTICO EN LA TRANSMISIÓN .....	73
4.5	PROTOTIPO DESARROLLADO Y SU RELACIÓN CON EL ESTÁNDAR IEEE 802.15.7 .....	74
4.5.1	Distancia alcanzada por el prototipo desarrollado, comparación con lo relacionado por el grupo de tarea IEEE 802.15.7.....	74
4.5.2	Comparación de las tasas de transmisión alcanzadas por el prototipo desarrollado y lo propuesto en el estándar IEEE 802.15.7.....	75
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....	77
5.1	CONCLUSIONES.....	77
5.2	TRABAJOS FUTUROS .....	78

REFERENCIAS .....	80
ANEXO A.....	82



## LISTA DE FIGURAS

Ejemplo de modulación OOK.....	18
Ejemplo de modulación VPPM con un nivel de <i>dimming</i> de 100%.....	19
Ejemplo de modulación VPPM con un nivel de <i>dimming</i> de 66%.....	19
Topologías de red propuestas por el estándar IEEE 802.15.7. ....	26
Diagrama de bloques de los módulos VLC del prototipo. ....	33
LEDs usados en la etapa de transmisión y su respectivo lente óptico.....	35
Esquema inicial de la etapa de transmisión.....	41
Esquema inicial de la etapa de recepción.....	43
Señal recibida por el fotodiodo a distintas distancias de la fuente de luz. ....	43
Respuesta del fotodiodo a distintas frecuencias. ....	44
Diagrama de flujo de la etapa de transmisión.....	46
Diagrama de flujo de la etapa de decodificación.....	48
Señal recibida y su decodificación.....	49
Esquemático del módulo VLC completo. ....	50
Implementación final de los módulos VLC. ....	51
Disposición de los módulos VLC para las distintas pruebas realizadas.....	53
Señal enviada por uno de los módulos VLC en configuración simplex.....	55
Señal recibida por uno de los módulos VLC. ....	56
Datos decodificados por el módulo VLC. ....	57
Señal enviada por el módulo VLC 1 y recibida por el módulo VLC 2.....	58
Señal enviada por el módulo VLC 2 y recibida por el módulo VLC 1.....	58
Tiempos de recepción y envío en el modo <i>half-duplex</i> . ....	59
Datos decodificados por los módulos VLC. ....	60
Esquema para el cálculo de los niveles de iluminación. ....	63
Tasa de error de bit en el modo simplex con variación de las tasas de transmisión y las distancias inter-módulo.....	67
Niveles de iluminación vs distancia de separación entre módulos.....	70
Tasa de error de bit para distintas potencias de transmisión en modo <i>simplex</i> . ....	71
Tasa de error de bit para distintas potencias de transmisión en modo <i>half-duplex</i> . ....	72

## LISTA DE TABLAS

Codificación Manchester.....	20
Capa física según el estándar IEEE 802.15.7 .....	27
Comparación de prototipos VLC .....	31
Comparación de posibles sistemas de procesamiento del prototipo VLC. ....	39
Variables estudiadas para la caracterización del prototipo. ....	61
Tasa de error de bit en la prueba de tasas de transmisión vs distancia. ....	68
Tasa de error de bit en la prueba de tasas de transmisión vs niveles de iluminación.....	69
Niveles de iluminación a distintas distancias y potencias de transmisión. ....	70
Tasa de error de bit en la prueba de distancia vs potencia de transmisión. ....	73
Tasas de error de bit obtenidas sin usar el lente óptico de los LED. ....	74
Comparación de la máxima distancia alcanzable por el prototipo desarrollado y lo propuesto por el estándar IEEE 802.15.7 .....	75
Comparación de las tasas de transmisión alcanzadas por el prototipo desarrollado y las propuestas por el estándar IEEE 802.15.7 .....	76

## RESUMEN

El uso de la tecnología actual en las comunicaciones ha ido en crecimiento a lo largo de los últimos años; desde la llegada de los computadores portátiles y los teléfonos inteligentes, cada día son más equipos los que intentan conectarse a la red de redes, internet, con el objetivo de tener acceso a bases de datos, entretenimiento, noticias, etc. La gran mayoría de estos aparatos lo hace mediante una conexión inalámbrica que utiliza el espectro radioeléctrico, por ejemplo, utilizando Wi-Fi.

El posible crecimiento desmedido del uso del espectro radioeléctrico ha impulsado el estudio de nuevas tecnologías de comunicaciones que no lo ocupen, entre éstas se encuentra la comunicación basada en luz visible o *VLC (Visible light Communication)*, por sus siglas en inglés), un tipo de comunicación inalámbrica que permite el envío de información usando las mismas luces que utilizamos para iluminar nuestros hogares, oficinas y espacios públicos sin ocupar el espacio radioeléctrico ni hacer interferencia con otros equipos que sí lo utilicen.

Este documento presenta el diseño e implementación de un prototipo de comunicación basado en luz visible, con el objetivo de realizar un acercamiento a dicha tecnología, sus principales características y restricciones. Para ello, se realiza primero un estudio de los conceptos claves existentes en el tema de los sistemas de comunicación basados en luz visible, su funcionamiento, ventajas y desventajas.

Una vez estudiados los sistemas VLC, se presentará el diseño e implementación del prototipo desarrollado, algunas pruebas necesarias para la validación y caracterización del prototipo, el análisis de las mismas y, por último, las conclusiones a las que se llegó durante el desarrollo del proyecto.

**Palabras clave:** Comunicaciones ópticas inalámbricas, codificación Manchester, modulación OOK, prototipo, VLC.

## ABSTRACT

The expansion of the use of current technology in communications has been growing over the past few years, since the arrival of laptops and smartphones, more and more devices are trying to connect to the network of networks, Internet, with the aim of having access to databases, entertainment, news, etc. Most of these devices do so through a wireless connection that uses radio waves, for example, using Wi-Fi.

The possible excessive growth of the use of the radioelectric spectrum has prompted the study of new communications technologies that do not employ it, among these is the VLC or Visible Light Communication, this is a type of wireless communication that sends information using the same lights that we use to illuminate our homes, offices and public spaces, without using radio frequency or interfering with other equipment that does it.

This document presents the design and implementation of a communications prototype that is based on the use of visible light, in order to make an approach to this technology, its main characteristics and restrictions. To achieve this, a study of the key concepts existing in VLC systems, its operation, advantages and disadvantages is made.

Once studied what are the VLC systems, the design and implementation of the developed prototype will be presented; After that, some necessary tests are presented to validate and characterize the prototype. Finally, the analysis of the tests and the conclusions reached during the development of this project are presented.

**Keywords:** Manchester coding, OOK modulation, optical wireless communications, prototype, VLC.

## INTRODUCCIÓN

La actual necesidad social de estar conectados en todo momento ha traído consigo un aumento en el uso de diversos dispositivos (teléfonos inteligentes, consolas de videojuegos, reproductores de música, etc.) con conexión a internet; esto ha hecho que, al igual que el número de personas conectadas, algunos problemas asociados a ello también aumenten, tales como, exposición de la información personal (seguridad), aumento de la utilización del espectro radioeléctrico generando problemas de congestión en las redes de datos, posibles efectos biológicos y de salud en el hombre debido a la exposición prolongada a la radio frecuencia, entre otros.

El desarrollo de este proyecto busca la construcción de un prototipo de sistema de comunicaciones que base su funcionamiento en el uso de luz visible; la rápida respuesta de conmutación de los diodos emisores de luz, conocidos como luces LED (los cuales son ampliamente utilizados como fuentes de iluminación hoy en día), permite que sean utilizados como transmisores de información, codificando mensajes en sus estados de encendido y apagado, brindándoles, así, la capacidad de proporcionar iluminación y comunicación al mismo tiempo.

Si se compara VLC con otros sistemas de comunicaciones que utilizan radiofrecuencia, se pueden encontrar ciertas ventajas que hacen importante realizar un acercamiento al uso de esta tecnología, entre ellas se pueden destacar las siguientes:

Debido al uso de luz visible como fuente de la información, es posible conocer a todos los equipos que envían y reciben datos en un momento determinado, lo cual brinda un control de seguridad infalible para detectar intentos de robo de información por parte de intrusos. Además de ello, la posibilidad de unir la infraestructura de iluminación ya existente con los sistemas de comunicación basados en luz visible representa otra gran ventaja.

La transmisión de información mediante el uso de luz visible no supone un riesgo a la salud de las personas y no genera interferencia electromagnética, esto se debe a que los sistemas VLC no utilizan radio frecuencia para la propagación de la información. Otro par de ventajas asociadas a esta tecnología de comunicaciones son presentadas en este documento.

Podría decirse que el primer prototipo de un sistema de comunicaciones basado en el uso de luz visible es el fotófono de Graham Bell, creado en el año 1880, éste utilizó un par de espejos de gran tamaño como transmisor y receptor, usando como medio para transportar el mensaje, la luz del sol, modulada mediante vibraciones en el espejo transmisor.

Los posteriores avances en el estudio de los diodos emisores de luz, la disminución de la relación costo sobre brillo y el aumento de la relación brillo sobre potencia necesaria en estos, también ha tenido un aporte importante en la

investigación de nuevas aplicaciones para los mismos, entre ellas las comunicaciones. Algunas investigaciones hablan de tasas de transmisión cercanas al gigabit por segundo mediante uso de la tecnología VLC con diodos LED, lo que supone un panorama prometedor para este tipo de sistemas.

El prototipo desarrollado brinda un acercamiento a la capa física de los sistemas VLC en sus modos de comunicación *simplex* y *half-duplex*, y basa su funcionamiento en un solo método de modulación y codificación.

Para el cumplimiento del objetivo general del proyecto se propuso una metodología que consistió primeramente en el diseño a nivel de hardware de los elementos que componen el prototipo, su posterior prueba de funcionamiento, luego el desarrollo del software que permite el control del prototipo y por último la realización de algunas pruebas de validación y caracterización al sistema completo desarrollado.

El desarrollo del prototipo del cual trata el documento es una oportunidad para incursionar en el área de las nuevas tecnologías de comunicaciones en el país, realizar un acercamiento investigativo a su funcionamiento y abrir el camino para nuevos proyectos que puedan basarse en los resultados encontrados y expuestos en este documento.

## **OBJETIVO GENERAL**

Construir un prototipo de un sistema de comunicaciones basado en transmisión por luz visible y comparar su funcionamiento con parámetros (distancia y tasa de transmisión) de capa física de la recomendación IEEE 802.15.7.

### **Objetivos específicos**

Identificar las variables y elementos fundamentales que gobiernan el envío y recepción de información en los sistemas de comunicación basados en luz visible.

Desarrollar un sistema prototipo transmisor-receptor que permita la transmisión de información mediante VLC.

Desarrollar un conjunto de pruebas y protocolos que permita validar, caracterizar y comparar el funcionamiento del prototipo respecto a los parámetros de distancia y tasa de transmisión expuestos en la recomendación de la IEEE 802.15.7.

## 1. MARCO REFERENCIAL

Este capítulo pretende realizar un acercamiento teórico acerca de la tecnología de comunicación inalámbrica basada en luz visible, los conceptos importantes del tema, limitaciones, ventajas y desventajas al momento de usarla; además de ello se presenta una introducción al estándar de la IEEE que trata sobre la tecnología bajo estudio, el funcionamiento básico de ésta y algunas de sus aplicaciones.

### 1.1 CONCEPTOS BÁSICOS

Antes de entrar de lleno al tema de las comunicaciones basadas en luz visible (*Visible Light Communication*, VLC, por sus siglas en inglés), es necesario definir algunos de los conceptos claves que se tratarán a lo largo de este documento, los cuales son presentados a continuación:

- **Espectro de luz visible:** El espectro electromagnético se encuentra dividido en bandas o segmentos en donde se clasifican las distintas radiaciones electromagnéticas posibles según su longitud de onda (o frecuencia), un ejemplo de una de estas bandas o segmentos es la banda óptica, la cual está comprendida por el espectro infrarrojo, de luz visible y ultravioleta; el espectro de luz visible es una porción del espectro electromagnético que comprende los rangos de longitud de onda entre los 400 nm (750 THz) y los 700 nm (428 THz) aproximadamente [1] [2].
- **Flicker:** Este se define como el efecto que ocurre durante los tiempos de intermitencia de una fuente de luz; dichos cambios pueden o no ser percibidos; según lo expuesto en [3], cuando estos son notables por el ojo humano pueden causar algunos cambios fisiológicos en su comportamiento y desencadenar en efectos secundarios como convulsiones, mareos y dolores de cabeza; en los sistemas VLC, el *flicker* se puede clasificar de dos maneras, como parpadeo entre tramas, el cual es el que se genera durante el espacio de envío de las tramas de datos o como parpadeo inter-tramas, en el cual el flicker es generado por el mismo esquema de modulación usado para enviar los datos [4].
- **Dimming:** Se conoce como *dimming* al control de luminosidad de la fuente de luz de acuerdo con los requerimientos del usuario; estos varían según el tipo de espacio a ser iluminado. En los sistemas de comunicación basados en luz visible se pueden agregar funciones que permitan controlar el dimming, lo cual se logra de diferentes maneras según los distintos métodos de modulación y codificación utilizados [4].
- **Frecuencia de conmutación óptica:** Ésta se refiere a la frecuencia a la cual es conmutada la fuente de luz al momento de transmitir los datos a enviar [4].

- Flujo luminoso: Puede definirse como la cantidad de energía luminosa radiada por una fuente de luz en un instante determinado, su unidad de medida es el lumen (lm). Según lo presentado en [5], un lumen equivale a 1,47 mW emitidos a la longitud de onda de 555 nm.
- Eficiencia lumínica: Según [5], se puede definir la eficiencia lumínica o rendimiento luminoso de una fuente de luz como la relación entre el flujo luminoso emitido por la luminaria y la potencia eléctrica consumida por la misma.
- Comunicación óptica inalámbrica: La comunicación óptica inalámbrica es la rama de las comunicaciones ópticas que busca solucionar problemas de comunicación mediante el transporte de la información usando luz visible, infrarroja o ultra violeta de una forma no guiada, es decir, la información viaja a través del espacio libre, brindando soluciones de alta tasa de transmisión con enlaces de mínima interferencia para comunicaciones Infraestructura a infraestructura, computador a computador y redes de sensores [1] [6].
- Patrón de radiación en luces LED: Se refiere a la manera en que es radiada la energía luminosa desde los diodos emisores de luz en relación con el ángulo que se forma con respecto a la línea de dirección de máxima luz; este patrón depende del tipo de lente óptico que usen los LED.
- Campo de visión en fotodetectores: Es el máximo ángulo abarcable por un fotodetector al momento de medir la energía óptica emitida por una fuente de luz. Indica la manera en que se relaciona la cantidad de energía percibida por fotodetector y su respuesta asociada, según el ángulo formado entre el flujo luminoso percibido y el área de detección.
- Espectro radioeléctrico: Se refiere a una porción del espectro electromagnético que está comprendida entre las frecuencias de los 3 Hz y los 300 GHz. Las ondas de radio, televisión, internet y telefonía móvil son transmitidas bajo estas frecuencias.
- Capa física en un sistema de comunicación: Es una de las capas del modelo de referencia OSI y se encarga de proporcionar los medios físicos, mecánicos y de procedimientos para activar, mantener o desactivar una conexión física entre sistemas de comunicaciones.
- Tasa de transmisión: Se puede definir como el máximo número de bits que es posible transmitir por unidad de tiempo.
- Comunicación serial: Es un tipo de comunicación en que los datos son enviados de manera secuencial. En el desarrollo del prototipo del cual habla este documento, se usa comunicación serial para conectar a los módulos VLC y un computador.
- Modo de comunicación *simplex*: Es un tipo de transmisión que puede llamarse también unidireccional. En ésta el receptor no está habilitado para contestar al transmisor.
- Modo de comunicación *half-duplex*: En este tipo de comunicación se encuentra habilitada la comunicación en ambos sentidos del canal, con la restricción de que puede ocurrir solamente en una dirección a la vez.



- Internet de las cosas: Una descripción sencilla del internet de las cosas es la de brindar conectividad a internet a objetos del común que pueden encontrarse dentro de nuestros hogares, con el objetivo de compartir información relevante de algún tipo.

## **1.2 COMUNICACIÓN BASADA EN LUZ VISIBLE LIMITACIONES, VENTAJAS Y DESVENTAJAS**

En esta sección se describe el funcionamiento general de los sistemas de comunicación basados en luz visible, la manera en que es lograda la transmisión de datos en estos, al igual que la recepción de dichos datos. También se presentan las limitaciones, ventajas y desventajas vinculadas al uso de los sistemas VLC.

**1.2.1 Transmisión de la información en los sistemas VLC.** Actualmente, los sistemas de iluminación convencionales (lámparas fluorescentes de halógeno o tungsteno) vienen siendo reemplazados por sistemas de iluminación tipo LED, debido a su mayor tiempo de vida, eficiencia y menor costo. El crecimiento de la disponibilidad de sistemas de iluminación de este tipo agrega una ventaja de consideración al momento de pensar en implementar sistemas VLC que combinen estas dos aplicaciones de los LED, iluminación y comunicaciones [7].

La mayoría de las veces, los LED son utilizados como dispositivo transmisor en los sistemas VLC, debido a lo antes mencionado, con el fin de explotar la infraestructura de iluminación ya existente y además gracias a que presentan ciertas ventajas comparados con otras fuentes de iluminación, algunas de ellas son, bajo consumo de potencia, iluminación instantánea, no irradian rayos UV y alta velocidad de conmutación [8].

La transmisión de la información en los sistemas VLC aprovecha la alta velocidad de conmutación de los LED para la transmisión de los datos. Este proceso de conmutación es realizado generalmente por transistores tipo MOSFET, los cuales se controlan mediante la información modulada proveniente de un sistema de procesamiento ya sea un computador, microcontrolador o FPGA (*field programmable gate array*, por sus siglas en inglés).

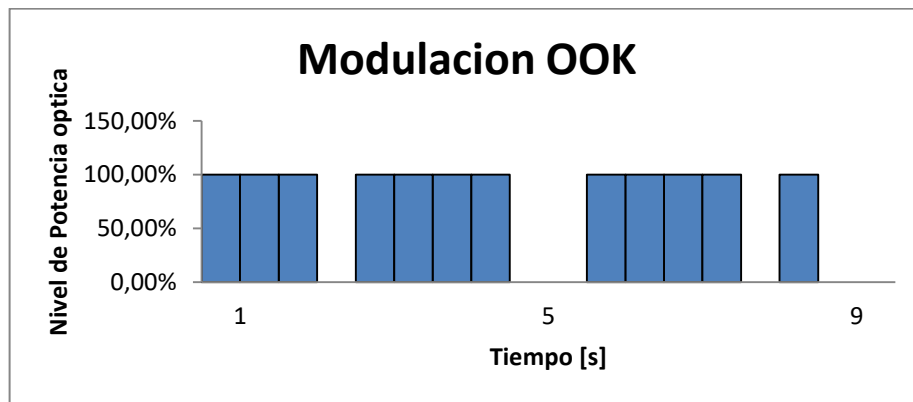
Para obtener la información modulada, ésta se convierte previamente de analógica a digital (en caso de ser una señal analógica la que se envía), se codifica y modula con alguno de los métodos comúnmente utilizados en los sistemas VLC.

En las comunicaciones basadas en luz visible, según lo encontrado en [4] y [9], generalmente se utilizan tres tipos de modulación, OOK, VPPM y CSK. De igual manera son utilizados tres tipos de codificación, Manchester, 4B6B y 8B10B. A continuación, se describen cada uno de estos tipos de modulación y codificación.

### 1.2.1.1 Modulación OOK

Este tipo de modulación es una de las más sencillas y se basa en lo que indica su nombre, modulación por encendido y apagado (*On-off keying*, por sus siglas en inglés). La información es transmitida por un periodo de “T” segundos, durante el cual, al enviar un “1”, la fuente de luz emitirá potencia óptica, es decir que estará encendida y al enviar un “0”, estará apagada [9].

Figura 1.1 Ejemplo de modulación OOK



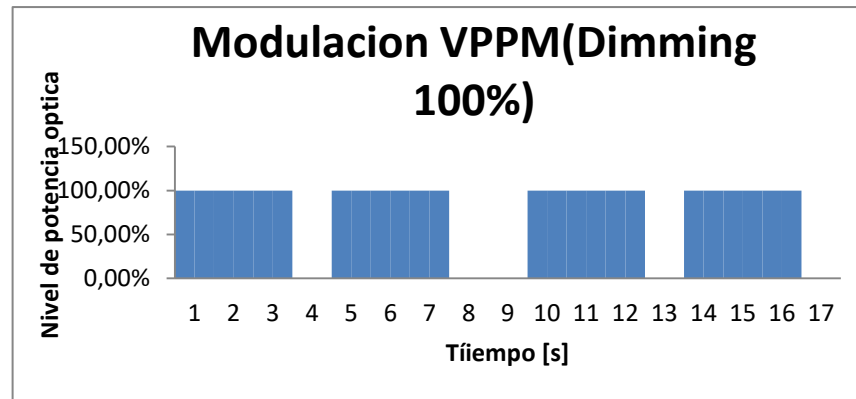
Elaboración propia.

En la figura 1.1 se muestra un ejemplo de modulación OOK, en la que el periodo “T” es igual a 0,5 segundos; primeramente, se envía “11101111” y luego se envía “00111101”. En este caso, el nivel de potencia óptica transmitida para los “1” es de 100% y de 0% para los “0”. Es posible que los niveles de potencia óptica cambien en este tipo de modulación, buscando llegar al nivel de *dimming* deseado por el usuario; por ejemplo, es posible encontrar un nivel del 50% de potencia óptica para los “0” y 100% para los “1” con el fin de no tener oscurecimientos en la fuente de luz en caso de tener una cadena de “0” muy larga en la transmisión.

### 1.2.1.2 Modulación VPPM

Es conocida como modulación por posición de pulso variable (*variable pulse position modulation*, por sus siglas en inglés) y transmite los bits “0” como un pulso al inicio del símbolo con periodo de duración “T” y los bits “1” como un pulso al final del mismo. La ventaja de este método de modulación es que el *dimming* puede ser controlado de manera directa sin afectar la comunicación, siempre y cuando el nivel de iluminación no se lleve a cero, la duración del pulso de “1” o “0” dependerá del nivel de *dimming* deseado por el usuario [9].

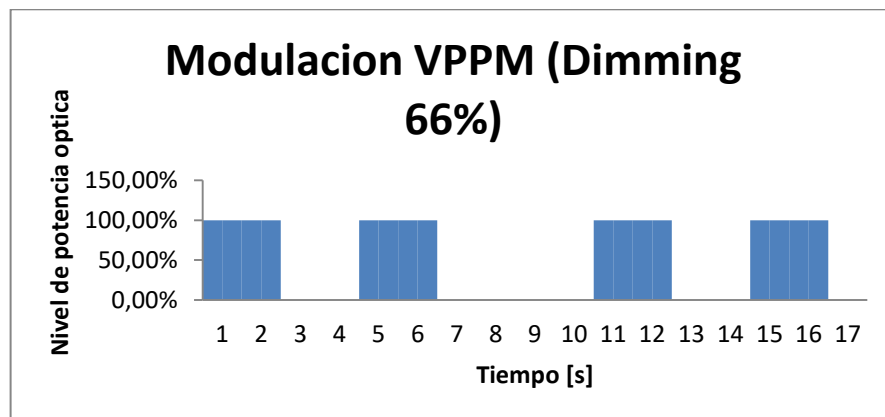
Figura 1.2 Ejemplo de modulación VPPM con un nivel de *dimming* de 100%



Elaboración propia.

En la figura 1.2 se presenta un ejemplo de modulación usando el método VPPM, la señal transmitida corresponde a la cadena de bits “0011”; en este caso el periodo “T” es igual a cuatro segundos, en el cual el máximo tiempo utilizable por la duración del pulso tanto para los bits “0” como para los bits “1” es de tres segundos y esta duración de tres segundos representa un nivel de *dimming* del 100%. En la figura 1.3 se muestra el envío de la misma cadena de bits con un nivel de *dimming* del 66% y un “T” de igual duración, 4 segundos.

Figura 1.3 Ejemplo de modulación VPPM con un nivel de *dimming* de 66%



Elaboración propia

### 1.2.1.3 Modulación CSK

Conocida como modulación por desplazamiento de color (*color shift keying*, por sus siglas en inglés). Se utilizan LED multicolores, por lo general RGB; en este tipo de modulación, los símbolos son seleccionados de manera que el flujo luminoso de la fuente de luz permanece constante, lo que evita el problema del *flicker*, mientras que la cromaticidad instantánea, es decir la saturación del color, varía; los datos son enviados sobre los distintos colores del led RGB, mientras que la coloración percibida se mantiene constante, las señales ópticas que se propagan en el espacio libre se detectan por un grupo de tres fotodetectores los cuales poseen filtros para trabajar con las frecuencias respectivas de cada color [10].

### 1.2.1.4 Codificación Manchester

Este es un tipo de codificación usado en comunicaciones y almacenamiento de datos, el cual consiste en codificar los “0” y “1” mediante cambios del nivel de la señal durante el periodo del reloj de sincronización; en la tabla 1 se muestra de qué manera se codifican los datos.

Tabla 1. Codificación Manchester

Dato binario	Codificación Manchester	
	Durante la primera mitad del ciclo de reloj	Durante la segunda mitad del ciclo de reloj
0	0	1
1	1	0
Fuente: Estandar IEEE 802.15.7 [4].		

En los sistemas VLC, lo que se busca al utilizar codificación Manchester, según [4], es obtener un balance en el nivel de DC que se entrega a la fuente de luz y con ello mantener un nivel de *dimming* según lo requerido por el usuario.

### 1.2.1.5 Codificación 4B6B

Con el fin de obtener un nivel de DC balanceado, en 4B6B se realiza un mapeo para una entrada de 4-bit a una salida de 6-bit. La salida resultante, es decir, el dato codificado presenta un mismo número de “1’s” y “0’s”, lo cual brinda un nivel

de iluminación fijo del 50% [6]; en la sección de anexos se presenta una tabla que muestra la manera en que se codifican los datos en 4B6B.

#### 1.2.1.6 Codificación 8B10B

En este tipo de codificación se busca tener un balance en el nivel de DC, al igual que con los dos métodos anteriormente mencionados. En 8B10B se realiza un mapeo que sigue las siguientes reglas de codificación: Los 5 bits menos significativos de la entrada de 8-bit son convertidos a 6-bit usando codificación 5B6B, luego los tres bits más significativos de la entrada se convierten a 4 bits utilizando codificación 3B4B, la concatenación de estas dos cadenas de bits forma el símbolo de 10-bit en el cual el número de “1” y “0” son balanceados.

**1.2.2 Descripción del canal en sistemas VLC.** En los sistemas VLC, la información modulada viaja en forma de luz por el espacio libre. Estos sistemas están pensados para funcionar en dos tipos de ambientes, interiores (hogar, oficinas y complejos industriales) y exteriores (comunicación vehículo a vehículo, comunicación de infraestructura a vehículo y comunicación infraestructura a infraestructura).

El enlace entre el transmisor y el receptor en los sistemas de comunicación basados en luz visible puede ser LOS (*Line of sight*, por sus siglas en inglés) o difuso, NLOS (*No line of sight*, por sus siglas en inglés).

En la configuración LOS existe un camino directo, sin obstrucciones y alineado visualmente entre el patrón de radiación del transmisor y el campo de visión del receptor [11].

Cuando la configuración de comunicación es de tipo NLOS, tan solo una porción de la luz radiada por el transmisor llega al receptor, debido a que, durante el viaje del mensaje, éste puede rebotar una o más veces en las distintas obstrucciones (muros, techo, escritorios, entre otros objetos) que se presentan a lo largo de su camino. La cantidad de luz recibida dependerá de la geometría de la habitación y la ubicación o disposición de cada objeto en ella [11].

A diferencia del canal con configuración LOS, en los canales con configuración difusa, el receptor o los receptores podrían recibir varias porciones de la misma señal transmitida pero con diferentes amplitudes y con retrasos temporales, éste es uno de los problemas a combatir en los sistemas VLC de canal difuso puesto que podrían traducirse en mala decodificación de la información e incluso en pérdida de ella [6].

El estándar IEEE 802.15.7 adoptó modelos del canal basados en cuatro escenarios de interiores: Lugares de trabajo (oficinas con escritorios, con o sin cubículos), oficinas con iluminación secundaria, sala de un hogar y celdas de

manufactura; el modelamiento del canal en este tipo de escenarios toma en consideración los siguientes elementos y variables según [12] :

- Tamaño de la habitación.
- Número de luces que transmiten información y su disposición en la habitación (Transmisores).
- El patrón de radiación de cada transmisor.
- La eficiencia lumínica del transmisor.
- Las características de reflexión de cada objeto en la habitación, considerando paredes, techo y los humanos dentro de ésta.
- Localización del receptor o los receptores.
- Campo de visión del receptor (FOV, por sus siglas en inglés).
- Y el área de detección del receptor.

Como se evidencia, son variados los factores que podrían modificar el comportamiento del canal mediante el cual viaja la información en los sistemas VLC; según [12], para lograr la definición del comportamiento de éste se toman en cuenta el retardo de propagación y la ganancia DC del mismo.

**1.2.3 Recepción de la información en sistemas VLC.** Para realizar la recepción de la información en los sistemas VLC se utilizan dispositivos que convierten las señales ópticas en señales eléctricas, tales como fotodiodos, cámaras de alta velocidad o sensores de imagen [9]. La señal óptica recibida es enviada luego de su posterior conversión a señal eléctrica a una etapa de amplificación y luego a una unidad de procesamiento que puede ser, como en el bloque de transmisión, una FPGA o un microcontrolador; dicha unidad de procesamiento se encarga de realizar el proceso inverso al que ha hecho la unidad de procesamiento del transmisor, es decir, se encarga de la decodificación de los datos y el tratamiento posterior de los mismos para la recuperación de la información enviada.

**1.2.4 Ventajas y desventajas de la tecnología VLC.** Los sistemas de comunicación basados en luz visible, como la mayoría de los sistemas de comunicación existentes, presentan tanto ventajas como desventajas al ser implementados; a continuación, se presentan algunas de las ventajas y desventajas encontradas para los sistemas VLC:

#### 1.2.4.1 Ventajas:

- Una de las principales ventajas de los sistemas VLC es la posibilidad de usar la infraestructura de iluminación tipo LED ya existente en distintos lugares como universidades, hogares y oficinas para hacer posible la comunicación [13].
- El uso de la luz visible para las comunicaciones es totalmente libre a diferencia del uso de la radio frecuencia para el mismo fin; esta última se encuentra

regulada y su uso representa un costo para los operadores de este tipo de comunicaciones. Además de ello, los sistemas VLC no interfieren con los demás métodos de comunicación que utilizan el espectro radioeléctrico [13].

- No producen ningún tipo de interferencia en la banda ISM (industrial, científica y médica, por sus siglas en inglés) [6].
- Tal como se menciona en [14], la energía eléctrica usada para los sistemas VLC es casi gratuita, puesto que estos funcionan sobre los sistemas de iluminación ya existentes, solo se utiliza energía extra en el proceso de control de los circuitos necesarios para realizar la comunicación.
- A diferencia de las señales de radio frecuencia, las señales en el espectro de luz visible no son capaces de pasar a través de gran cantidad de objetos, esto representa una ventaja para los sistemas VLC, puesto que la información se encontraría confinada en el lugar donde se disponga el sistema, evitando así posibles casos de espionaje para información confidencial [14].
- En sistemas VLC no se utiliza radiofrecuencia, lo que hace que el uso de dicha tecnología no tenga efectos secundarios en la salud humana ni en dispositivos que puedan alterar su funcionamiento al exponerse a ondas de radio, como por ejemplo durante el despegue o aterrizaje de una aeronave [13].
- La posibilidad de alcanzar grandes tasas de datos con sistemas VLC es otra de sus principales ventajas. En la literatura relacionada se reportan prototipos con una tasa de datos de más de 1 Gbps [2].

#### 1.2.4.2 Desventajas:

- La no recepción de flujo luminoso por parte del receptor VLC significa comunicación nula, es decir que la intromisión de un cuerpo sólido que impida el paso de los fotones desde el transmisor hacia el receptor conllevará a pérdida de información o imposibilidad de realizar la comunicación.
- Los receptores de los sistemas VLC cuentan el número de fotones recibidos desde cualquier fuente de luz; esto hace que el sistema de comunicación tenga que combatir con diferentes fuentes de ruido debidas a la iluminación solar, monitores y otras fuentes de iluminación artificial [15].
- Existen ciertas restricciones que limitan el comportamiento general de los sistemas de comunicación basados en luz visible, tales como desplazamiento de color, control de *dimming* y eficiencia del sistema de iluminación [16].

**1.2.5 Limitaciones en los sistemas VLC.** Como se mencionó, existen ciertas restricciones ligadas a los dispositivos de iluminación y la percepción de la luz que representan algún tipo de limitación para los sistemas de comunicación basados en luz visible, debido a que se busca que VLC supla al tiempo las necesidades de iluminación y comunicación sin alterar el funcionamiento individual de cada servicio. A continuación, se exponen algunas de la más importantes restricciones y limitaciones que podrían considerarse a la hora de diseñar un sistema VLC.

#### 1.2.5.1 Limitaciones de iluminación

A la hora de implementar un sistema de comunicaciones basado en luz visible en un espacio real, como una oficina o la habitación de un hogar, aparece una limitación importante para el lado transmisor, el control de la iluminación. Éste no debe afectar el envío de datos bajo ninguna circunstancia. Las preferencias de iluminación de los usuarios, tales como el cambio de los niveles de iluminación, el cual supone un cambio en el flujo luminoso que llega a los receptores, al igual que la posición de las luminarias dentro de la habitación u oficina, representan limitaciones de iluminación las cuales deben ser tenidas en cuenta en el diseño del sistema VLC, para hacer que el usuario pueda mantener el control sobre los aspectos de iluminación que desee, al igual que con luminarias comunes.

Existe otra limitación importante en cuanto a la iluminación y el lado transmisor de los sistemas VLC, la cual es mencionada en [15]; ésta es que la modulación de los datos a enviar no debe ser percibida por el usuario en ningún momento, fenómeno conocido como *flicker* y que es totalmente indeseado; dicho fenómeno ocurre cuando la información es modulada a frecuencias lo suficientemente bajas para ser percibidas por el ojo humano.

#### 1.2.5.2 Restricciones de las luminarias tipo LED

Las propias luminarias tipo LED agregan algunas limitaciones o restricciones a los sistemas de comunicaciones basados en luz visible; una de ellas es que la fuente de luz debe intentar conservar la eficiencia y tiempo de vida útil con la cual un fabricante la ha puesto en el mercado. Según lo expuesto en [17], puede ser posible que la diferencia entre la señal modulada y el nivel de polarización de las luces LED influyan en el periodo de vida útil de las mismas, cuando dicha diferencia es mayor a un rango de voltajes propios de cada luminaria. También se expone que debe garantizarse que el nivel de polarización permita al LED trabajar en su zona de operación lineal para evitar deterioros en cuanto al tiempo de vida útil.

Para obtener luz blanca mediante el uso de diodos emisores de luz, generalmente se utilizan dos métodos; uno de ellos combina las longitudes de onda de los colores verde, azul y rojo, dando como resultado la luz blanca, los diodos que utilizan este método son denominados LED RGB; el otro método combina la luz de un LED azul con una capa de fosforo que absorbe la energía lumínica y la convierte en una con longitud de onda mayor, dando como resultado luz blanca, el inconveniente del segundo método aparece puesto que la capa de fosforo utilizada en los LED mencionados con anterioridad, limitan la capacidad del mismo para responder ante cambios de brillo a frecuencias mayores a los 2 MHz [15], lo cual representa una limitación a la hora de buscar alcanzar altas tasas de transmisión.

La mayoría de los sistemas de iluminación tipo LED ya existentes e instalados en universidades, hogares y oficinas, utilizan fuentes de alimentación conmutadas, las cuales permiten mantener una alta eficiencia; generalmente, estas fuentes



pueden conmutar entre 100 kHz y 500 kHz. Como se ha mencionado con anterioridad, una de las ventajas que supone el uso de sistemas VLC es el de utilizar la infraestructura de iluminación ya existente, aprovechando así el uso de circuitería ya existente sin aumentar significativamente el consumo de energía.

Al buscarse tasas de transmisión mayores a los cientos de kilobit por segundo, el uso de los circuitos de conmutación ya existentes en las luminarias representan una limitación, puesto que se requiere de mayores frecuencias de conmutación (de unos cuantos millones de Hertz) para aumentar la tasa de transmisión; esto hace necesario la inclusión de circuitería externa, lo que a su vez podría llevar a pérdidas de eficiencia en el sistema VLC aumentando el consumo de energía [15].

### **1.3 ESTÁNDAR IEEE 802.15.7**

En esta sección se presentan algunos de los puntos más relevantes del estándar de la IEEE asociados con el diseño e implementación del prototipo del cual trata el presente documento.

El grupo de tarea de la IEEE 802.15.7 publicó en el año 2011 el estándar que lleva como nombre, “Estándar para redes de alcance local y metropolitano: apartado 15.7, comunicación óptica inalámbrica de corto alcance usando luz visible”.

En el estándar mencionado se describe el uso de la tecnología VLC para redes de tipo *WPAN* (*Wireless personal area network*, por sus siglas en inglés), redes inalámbricas de acceso personal, las cuales se utilizan para conectar dispositivos de manera inalámbrica en un máximo de 10 metros.

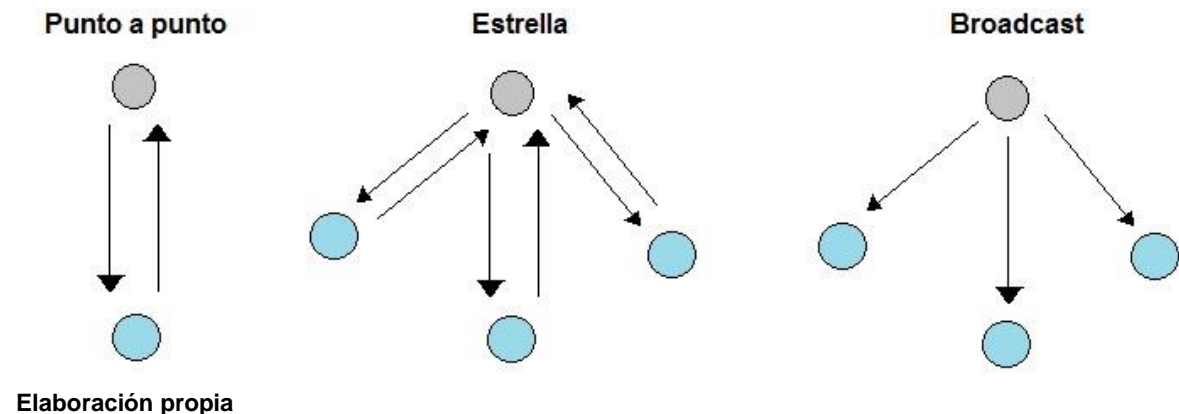
**1.3.1 Alcance del estándar.** El estándar proporciona recomendaciones de diseño de sistemas de comunicación óptica inalámbrica de corto alcance tanto para la capa física como para la de enlace de datos, usando para ello luz visible. El estándar también brinda la capacidad de alcanzar tasas de transmisión suficientes para soportar servicios multimedia de audio y video, tomando en consideración la movilidad del punto de enlace y compatibilidad con la infraestructura de iluminación ya existente [4].

**1.3.2 Propósito del estándar.** El propósito general es el de crear un estándar para las comunicaciones ópticas inalámbricas de corto alcance proporcionando acceso a centenares de THz de espectro electromagnético sin regulación, inmunidad frente a la interferencia electromagnética que puedan generar otros sistemas de comunicación y garantizar la no interferencia con sistemas de comunicación que utilizan radio frecuencia, todo ello mediante el uso de la luz visible como medio de transporte de la información. Otro propósito del estándar es brindar seguridad a los usuarios, puesto que estos podrán apreciar el canal de comunicación en todo momento, conociendo quien utiliza el canal en cada

instante. Por último, el grupo de tarea de la IEEE pretende que el estándar ayude a adicionar características de comunicación a la infraestructura de iluminación existente [4].

**1.3.3 Topologías de red propuestas en el estándar IEEE 802.15.7.** El estándar considera tres tipos de dispositivos para el uso de la tecnología VLC: infraestructura, dispositivos móviles y vehículos. Para los dispositivos considerados, el estándar propone tres topologías de red, en estrella, punto a punto y broadcast. En la figura 1.4 se muestran las tres topologías, cada una de las esferas representa un dispositivo.

Figura 1.4. Topologías de red propuestas por el estándar IEEE 802.15.7.



En la comunicación punto a punto, ambos dispositivos pueden comunicarse entre ellos, uno de los dispositivos toma el rol de coordinador con el objetivo de ser el primero en iniciar la transmisión de datos en el canal.

En la topología de estrella cada dispositivo tiene una identificación, el dispositivo central actúa como coordinador y, según estas identificaciones, permite a otros unirse a la red.

En el modo broadcast, el dispositivo central puede enviar información a otros sin necesidad de tener en cuenta sus identificaciones; en esta topología la comunicación es unidireccional.

**1.3.4 Capa física según el estándar IEEE 802.15.7.** El estándar soporta distintos tipos de capa física, los cuales son descritos en [4] como: PHY I, PHY II y PHY III, cada uno de ellos tiene recomendaciones distintas para el tipo de modulación, codificación y frecuencia de conmutación óptica. Además, se espera que cada capa física sea utilizada para distintos tipos de aplicaciones, esto debido a que

cada una de ellas permite alcanzar un rango distinto de tasas de transmisión. En la tabla 2 se describen de manera resumida cada *PHI* mencionada en el documento de la IEEE.

**Tabla 2. Capa física según el estándar IEEE 802.15.7**

Capa física	Tipo de modulación	Codificación	Frecuencia Reloj óptico	Tasa de transmisión
PHY I	OOK	Manchester	200 kHz	11,67 kb/s a 100 kb/s
	VPPM	4B6B	400 kHz	35,56 kb/s a 266,6 kb/s
PHY II	VPPM	4B6B	3,75 MHz y 7,5 MHz	1,25 Mb/s a 5 Mb/s
	OOK	8B10B	15, 30, 60 y 120 MHz	6 Mb/s a 96 Mb/s
PHY III	M-CSK	No codificación	12 y 24 MHz	12 Mb/s a 96 Mb/s
Fuente: IEEE Standard for Local and metropolitan area networks — Part 15 . 4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks [4]				

**1.3.4 Dimming y mitigación del flicker.** En el estándar se presentan los métodos que brindan soporte para controlar la intensidad de la fuente de luz y la manera adecuada para evitar el parpadeo o *flicker*.

Mediante la introducción de un nivel de DC en los periodos de no transmisión entre los datos enviados, puede realizarse una compensación del *dimming* según lo deseado por el usuario; los niveles de DC pueden ser logrados mediante el uso de herramientas comúnmente utilizadas como el PWM.

El fenómeno del parpadeo sucede cuando una fuente de luz está cambiando su brillo en periodos de tiempo menores al *MFTP* (*máximum flickering time period*, por sus siglas en inglés) [4]. Según lo encontrado en [3], frecuencias menores a 162 Hz podrían causar *flicker* que afecte la salud humana.

La mitigación del *flicker* intra-tramas, según el estándar, puede lograrse mediante el uso de los métodos de codificación mencionados en la tabla 2 o el método de modulación VPPM mostrado en la misma, cuando se usan las frecuencias de conmutación ópticas sugeridas por cada capa física.

Para la mitigación del efecto de parpadeo inter-tramas se utiliza la misma solución del control de los niveles de iluminación, puesto que de esa manera se evita que existan largos periodos de ausencia de luz durante cada trama enviada.

## **1.4 APLICACIONES DE LAS COMUNICACIONES BASADAS EN LUZ VISIBLE Y ALGUNOS EJEMPLOS**

Existe un buen número de áreas en las cuales pueden ser utilizados los sistemas VLC sin que interfieran con otros sistemas de comunicación que utilizan el espectro radioeléctrico. Las aplicaciones del VLC se pueden dividir en dos grandes grupos: Aplicaciones en interiores y aplicaciones en exteriores.

**1.4.1 Aplicaciones en interiores.** Dentro de este grupo de aplicaciones se encuentran las siguientes:

- Descongestión del espectro de radio frecuencia: El uso de sistemas VLC como tecnología de apoyo para los sistemas de comunicación que usan radio frecuencia podría ayudar a reducir el uso del espectro, evitando así problemas de congestión que lleven a pérdidas de datos o uso ineficiente de energía eléctrica.
- Iluminación inteligente: Se utilizaría la iluminación del hogar como puntos de acceso a internet y permitiría el control de iluminación a través de dispositivos móviles.
- Localización en interiores: Es una aplicación explota la configuración en modo broadcast de los sistemas VLC, en los cuales cada luminaria LED (fija) envía una identificación (LED ID), que se procesa en el receptor, el cual puede ser un dispositivo móvil, la información se relacionaría con la posición fija de cada lámpara en un mapa. Esta aplicación puede utilizarse como guía en museos, bibliotecas, centros comerciales y supermercados.
- Comunicación entre objetos fijos, móviles e infraestructura [13], [2]: Es una aplicación que permitiría a distintos objetos del hogar u oficina, tales como impresoras, televisores y computadores comunicarse con dispositivos móviles o con las luminarias LED, con el fin de compartir información relevante para control de los dispositivos del hogar o para entrar en el ámbito de internet de las cosas.
- Comunicación inalámbrica en hospitales: Es una aplicación que explota la ventaja de los sistemas VLC de no producir interferencia en la banda ISM (Industrial, científica y médica, por sus siglas en inglés) [6], lo cual permite una conexión inalámbrica segura que no afecta los dispositivos médicos utilizados en hospitales.
- Comunicación dentro de aeronaves: El uso de radio frecuencia puede alterar los sistemas de las aeronaves en el momento de su despegue y aterrizaje, la utilización de sistemas VLC podría ser una opción para el envío de información de interés para los pasajeros, sin usar radio frecuencia, lo cual podría lograrse utilizando la iluminación interior del avión y los dispositivos móviles de los pasajeros.

**1.4.2 Aplicaciones en exteriores.** Las siguientes son aplicaciones de VLC dentro del grupo de aplicaciones en exteriores:

- Iluminación inteligente: Al igual que con las luminarias en interiores, las lámparas de iluminación de las calles pueden utilizarse para el envío de información relevante respecto al estado de las calles, control de la iluminación, entre otras.
- Posicionamiento: Utilizando las lámparas de las calles, se puede enviar información acerca del lugar en que se encuentra un transeúnte o una persona que conduce un vehículo.
- Publicidad: Es posible realizar el envío de información publicitaria relevante, según el lugar en el que se encuentre un usuario, utilizando la iluminación exterior existente.
- Sistemas de conducción asistida: Debido al número de lámparas que poseen los vehículos en general (automóviles y motocicletas), es posible diseñar sistemas de conducción asistida que exploten las características del VLC para efectos de comunicación vehículo a vehículo.
- Comunicaciones submarinas: El uso de la radio frecuencia bajo el agua se hace poco efectiva debido al paso de las ondas a través del medio [14], la tecnología VLC puede contemplarse como una alternativa para dicho tipo de comunicaciones.

**1.4.3 Ejemplos de aplicación de la tecnología VLC.** Es importante mencionar que gran parte de las aplicaciones de VLC tanto para interiores como para exteriores son aún tema de investigación de científicos alrededor del mundo. Su puesta en marcha requiere de la superación de limitaciones y restricciones que puedan encontrarse en cada aplicación. A continuación, se presentan unos ejemplos de aplicación de la tecnología VLC:

Transmisión de audio en tiempo real. M. Gujar et al, publicaron en el año 2016 un artículo en el cual presentan el prototipo de un sistema embebido de transmisión de audio en tiempo real, el cual utiliza VLC para realizar la comunicación inalámbrica; en dicho prototipo un computador envía el audio a transmitir al sistema embebido, el cual lo digitaliza y controla las luces LED que al tiempo brindan iluminación y comunicación, el receptor procesa los paquetes VLC recibidos y convierte el audio de nuevo en digital para ser reproducido en una bocina [18].

Sistema VLC portátil y sintonizable. Higuera J. et al presentan en [19] un prototipo de un sistema VLC portátil que sigue algunas de las recomendaciones del estándar IEEE 802.15.7, capaz de ser conectado en cualquier toma corriente y con capacidad de conectarse a un computador a través de Ethernet, lo que hace que la posibilidad de desarrollar aplicaciones dentro del computador que exploten el sistema VLC sea elevada. La característica de sintonización del prototipo la brinda el uso de tres LED tipo RGB, los cuales transmiten individualmente y al mismo tiempo, aumentando así la tasa de transmisión global del sistema.

Aplicación VLC basada en el uso de las luces LED de los *Smartphone Android*. Wang Chao et al, presentan en [20], la forma en que pueden ser explotados los teléfonos inteligentes a la hora de diseñar aplicaciones de sistemas VLC, en el artículo muestran de qué manera es posible lograr que las lámparas LED de los teléfonos conmuten a distintas frecuencias, con el fin de lograr comunicación usando luz visible.

Sistema VLC basado en FPGA. W. Feng y X. Chen presentan un prototipo de sistema de comunicación por luz visible, mostrando la capacidad de diseñar aplicaciones VLC de hardware robusto mediante el uso de FPGA; toda la programación del prototipo se realizó mediante VHDL, los resultados que obtuvieron muestran la prometedora capacidad de los sistemas de comunicación basados en luz visible [21].

Localización en interiores usando VLC. En [22], se presenta un prototipo VLC que muestra de qué manera pueden usarse los sistemas VLC para desarrollar herramientas de localización en interiores, el prototipo le asigna a cada LED un número de identificación el cual es recibido y procesado mediante una técnica de proximidad que determina la posición en la cual se encuentra el receptor; el hecho de recibir información de varias luces LED al tiempo es contrarrestado haciendo uso de la técnica TDM (multiplexación por división de tiempo, por sus siglas en inglés), así, el receptor puede indicar su posición para dos tipo de situaciones: cuando solo recibe la señal de una lámpara o cuando se encuentra en la zona donde se traslapan dos o más lámparas.

Iluminación automotriz inteligente para seguridad vehicular. En [23], Yu et al presentan el diseño de un prototipo que integra las aplicaciones de iluminación inteligente y posicionamiento de los sistemas VLC, con el fin de hacer que la iluminación en vehículos proporcione ayuda al conductor a la hora de estar en la carretera, dicha ayuda consta de avisos de frenado y cambio de carril por parte de los demás vehículos en ruta, las pruebas de campo del prototipo muestran que es posible realizar el envío de avisos entre conductores con una velocidad relativa entre ellos de 40 km/h dando al conductor un tiempo de hasta 0.9 segundos para reaccionar en caso de un suceso repentino en la carretera.

La tabla 3 que se presenta a continuación muestra una comparación de las principales características encontradas en los ejemplos de aplicación de VLC expuestos anteriormente.

**Tabla 3. Comparación de prototipos VLC**

Autor(es)	Aplicación	Año	Tipo de modulación y codificación	Tasa de transmisión alcanzada (Efectiva de datos)	Distancia máxima alcanzada	Sistema de procesamiento utilizado
Mohit Sanjeevkumar Gujar Shrikant Velankar Arun Chavanc	Transmisión de audio en tiempo real	2016	OOK	No se especifica	3 metros	Atmega 328
J. Higuera Blai Verge M. Perálvarez J. Carreras	Sistema VLC portátil y sintonizable	2015	OOK	100 Kbps	8 metros	Mbed LPC1768
Chao Wang Zhidan Zhang Minglun hang	Aplicación VLC basada en Android	2015	OOK + codificación NZR	5 Kbps	No se especifica	Cortex-A9 a 1.5 GHz
Panarat Cherntanomwong Wisarat Chantharasena	Localización en interiores usando VLC	2015	OOK + TDM	No se especifica	2,8 metros	Atmega 2560
Shun-Hsiang Yu Oliver Shih Hsin-Mu Tsai	Iluminación automatizada inteligente para seguridad vehicular	2013	4-PPM	10 kbps	10 a 15 metros	Ettus USRP n200
Elaboración propia						

## 2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

En este capítulo se presentan las especificaciones de diseño e implementación del prototipo VLC desarrollado; además de ello se muestra su implementación y cada uno de los elementos necesarios para el funcionamiento del mismo.

### 2.1 ESQUEMA GENERAL DEL PROTOTIPO A DESAROLLAR

Para un sistema de comunicaciones en su modo de operación más sencillo (modo *simplex*), es mandatorio que exista un elemento trasmisor y otro receptor, puede suceder también que ambos sean capaces de cumplir dichas funciones y puedan operar en un modo más complejo (modo *half-duplex*). Para el caso del prototipo a desarrollar, se propone el diseño de dos módulos capaces de actuar como transmisores y receptores de comunicación basada en luz visible, los que de ahora en adelante serán llamados módulos VLC del prototipo.

Para el desarrollo de cada uno de los módulos VLC del prototipo se utilizaron herramientas de simulación, prototipado y desarrollo de software como apoyo a la hora de realizar el diseño del sistema final.

Para el diseño del hardware se contó con la ayuda de la herramienta *Proteus 8.1 de labcenter*<sup>1</sup>, para simular el funcionamiento de los microcontroladores con el fin de asegurarse de que las órdenes programadas funcionaran según lo esperado; de igual manera, el software mencionado fue utilizado para el diseño PCB de los módulos del prototipo.

La programación de los microcontroladores seleccionados se realizó mediante el software *Atmel studio 7.0 de Atmel corporation*<sup>2</sup>, el cual es un software de uso libre que permite la escritura ya sea en lenguaje C/C++ o ensamblador de las instrucciones que se requieren para el funcionamiento del prototipo; además de ello, para cargar los archivos hexadecimales en los microcontroladores, se utilizó el software *AVRDUDE*<sup>3</sup> el cual también es de uso libre.

En la figura 2.1 se presenta un diagrama de bloques que representa, de forma general, los módulos VLC del prototipo, estos se componen de distintas etapas: De alimentación, procesamiento, transmisión y recepción.

El prototipo final desarrollado cuenta con dos módulos VLC; cabe resaltar que, para facilidad a la hora de diseñar el software y hardware que componen dichos módulos, se trabajaron de manera individual las etapas de transmisión y recepción y luego fueron unidas a nivel de programación, como se especifica más adelante en la sección 2.3.

---

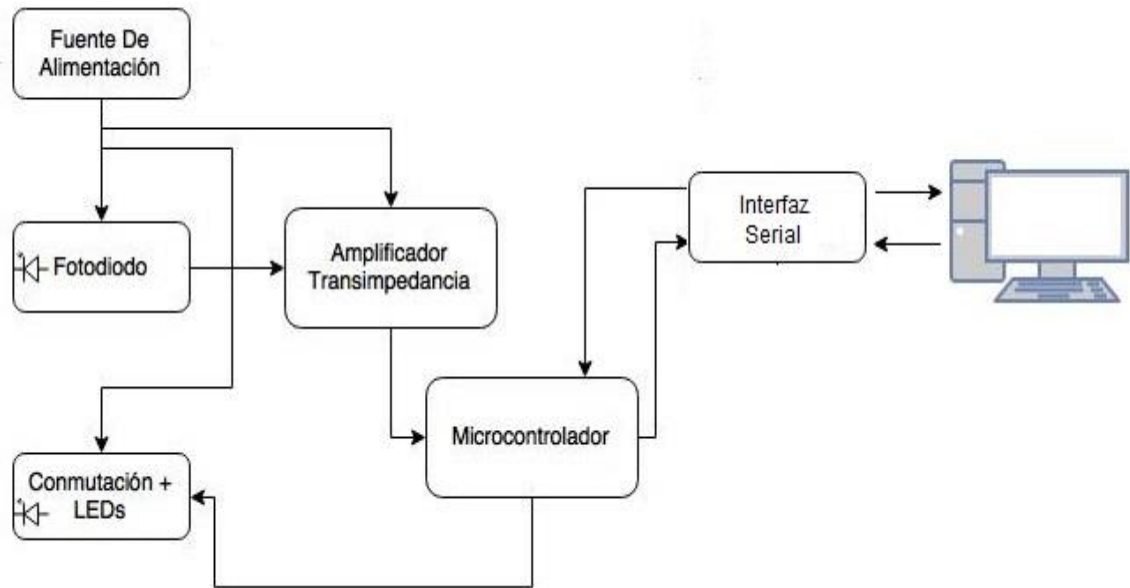
<sup>1</sup> Se puede encontrar en [www.labcenter.com](http://www.labcenter.com)

<sup>2</sup> Se puede encontrar en [www.atmel.com/microsite/atmel-studio/](http://www.atmel.com/microsite/atmel-studio/)

<sup>3</sup> Se puede encontrar en [www.bdmicro.com/devtools/](http://www.bdmicro.com/devtools/)



Figura 2.1. Diagrama de bloques de los módulos VLC del prototipo.



Elaboración propia

## 2.2 MÓDULOS VLC DEL PROTOTIPO

En esta sección se presentan las especificaciones de cada una de las etapas que componen los módulos VLC; cabe mencionar que el prototipo desarrollado tiene como principio de diseño en todas sus etapas igualar las tasas de transmisión mostradas en la tabla 2, específicamente para *PHY I*.

**2.2.1 Etapa de alimentación eléctrica.** Esta etapa es la encargada de entregar la potencia eléctrica necesaria para el funcionamiento de cada uno de los elementos que componen los módulos; primeramente, cada módulo se alimenta con una fuente dual de +/- 12 VDC, los cuales son niveles de voltaje tomados directamente de las fuentes eléctricas del laboratorio de electrónica de la universidad del Valle, que servirán para polarizar los distintos componentes electrónicos del prototipo, tales como: amplificadores operacionales, luces LED, fotodiodos y reguladores de voltaje para cada uno de los módulos VLC.

El microcontrolador requiere una alimentación de 5 VDC los cuales se obtendrán con una referencia de voltaje integrada; según la hoja de datos del microcontrolador atmega328p, el cual fue seleccionado como sistema de procesamiento del prototipo (se presenta en la sección 2.2.4), la máxima corriente de polarización cuando todos los pines del dispositivo funcionan como entradas es

de 14 mA para una frecuencia de 20 MHz, lo que indica que se requiere una referencia de voltaje capaz de entregar la mencionada cantidad de corriente. Debido a la disponibilidad inmediata del circuito integrado, se decidió utilizar el regulador de voltaje lm7805, capaz de suplir la corriente y el voltaje necesario para el funcionamiento del microcontrolador cuando se aplica un voltaje en su entrada dentro del rango de 7 VDC a 24 VDC.

La señal de salida del microcontrolador, encargada de transmitir el mensaje codificado hacia la etapa de conmutación y amplificación de las luces LED es de 0 o 5 VDC, dicha señal luego es amplificada para lograr el nivel de " $V_{GS}$ " adecuado, (cercano a 6 VDC), para lograr la corriente de saturación deseada en el transistor MOSFET, el cual se especifica más adelante en la sección 2.2.2. Con el fin de tener la mayor potencia de iluminación posible, las luces LED pueden ser alimentadas con máximo 12 VDC a través de la etapa de conmutación y amplificación, haciendo posible así el uso de un solo LED de alta potencia (más de 24 W) o un grupo de varias luces LED de mediana potencia (hasta 3 W).

La polarización del fotodiodo se realiza con -12 VDC los cuales son aplicados a través de su ánodo. En la sección 2.2.3 se tocarán más a fondo los temas relacionados con la recepción dentro de los módulos.

Los amplificadores operacionales usados en cada etapa del prototipo se alimentan de forma dual con +/- 12 VDC y son especificados más adelante.

**2.2.2 Etapa de transmisión.** Dentro de los módulos VLC, se encarga de realizar la adecuación de la señal proveniente del microcontrolador para que llegue de forma adecuada a la fuente de luz del módulo. Hacen parte de la etapa de transmisión un amplificador operacional, un transistor MOSFET y las luces LED que envían la información mediante luz visible al otro módulo.

**2.2.2.1 Luces LED.** Como bien se ha explicado antes, en los sistemas de VLC, la información a ser enviada es transmitida mediante luz, en este caso proporcionada por tres LED blancos de 1 W de potencia máxima, que se muestran en la figura 2.2.

Los principales parámetros del dispositivo en lo que respecta al desarrollo del prototipo, son el flujo luminoso generado por él mismo, la máxima disipación de potencia, el ángulo de visión y el conocimiento del patrón de radiación del LED. En el prototipo las luces LED seleccionadas tienen las siguientes características según la hoja de datos del fabricante:

- Disipación máxima de potencia de 1 W.
- Máximo 120 lm a máxima potencia.
- Angulo de visión sin amplificadores ópticos secundarios de 130°.

Estudiando el patrón de radiación de las luces LED seleccionadas, se encuentra que entre  $0^\circ$  y  $80^\circ$  el flujo luminoso generado se mantiene por encima del 90%, característica que junto con el ángulo de visión del fotodiodo hacen que los sistemas de VLC requieran de una calibración de línea de vista bastante precisa, ya que dicho flujo luminoso se encarga de hacer que el fotodiodo reaccione permitiendo el paso de una mayor o menor cantidad de corriente eléctrica a través de sus terminales.

Además de las luces LED se usa un lente óptico con ángulo de visión de  $30^\circ$  el cual permite que el patrón de radiación del LED no sea tan amplio, lo que conlleva a que la luz se direcciona de una mejor manera y el alcance del prototipo aumente.

Cabe mencionar que, aunque para las pruebas del prototipo desarrollado se utilizan las luces LED anteriormente mencionadas, es posible utilizar luces de mayor potencia debido al diseño de la etapa de conmutación y amplificación implementada.

**Figura 2.2. LEDs usados en la etapa de transmisión y su respectivo lente óptico.**



**Elaboración propia**

**2.2.2.2 Amplificador operacional.** Debe encargarse de llevar la señal proveniente del microcontrolador, en la cual ya se encuentra codificada la información a enviar, de sus valores originales de 0 a 5 VDC hasta unos de 0 a 6.3 VDC, esto con el objetivo de entregar un valor de voltaje adecuado a la compuerta del transistor tipo

MOSFET y hacer que éste permita el paso de corriente o no entre drenaje y fuente según los cambios en la señal enviada desde el microcontrolador.

Para el desarrollo de un prototipo como el aquí expuesto, las características más importantes del amplificador operacional en la etapa de transmisión son el ancho de banda, el cual debe ser suficiente para poder amplificar sin inconvenientes las señales provenientes del microcontrolador y los tiempos de respuesta, los cuales deben ser lo suficientemente rápidos para seguir las señales enviadas por el mismo.

Para el prototipo implementado se decidió utilizar un amplificador operacional LF353; según la hoja de datos del dispositivo, el producto ganancia ancho de banda del mismo es de 4 MHz y tiene un *slew rate* de 13 V/us.

Conociendo que el valor de la salida del amplificador operacional para esta etapa es de 6.3 VDC y que el *slew rate* es de 13 V/us, es posible realizar el cálculo de los tiempos de respuesta del dispositivo y así mismo la máxima frecuencia a la que puede operar de manera adecuada.

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = 13 \frac{V}{\mu s} \rightarrow \Delta t = \frac{\Delta v}{13 \frac{V}{\mu s}} = \frac{6.3 V}{13 \frac{V}{\mu s}} = 0.48 \mu s \quad (1)$$

Con el tiempo de respuesta calculado con la ecuación 1 es posible calcular la frecuencia máxima de operación para el dispositivo bajo las condiciones mencionadas anteriormente.

$$T = 0.48 \mu s * 2 \cong 1 \mu s \rightarrow F_{max} = \frac{1}{T} = 1 MHz \quad (2)$$

Como se mencionó, el prototipo busca igualar las tasas de transmisión para la capa *phy* I del estándar proporcionado por el grupo de tarea 802.15.7 de la IEEE, en el cual se especifica una frecuencia máxima de 200 kHz; lo anterior indica que el amplificador operacional seleccionado cumple con las especificaciones de diseño para la etapa.

**2.2.2.3. Transistor MOSFET.** Es el elemento de conmutación de los módulos, se encarga de permitir que las luces LED sean o no polarizadas según el mensaje enviado desde el microcontrolador, permitiendo así que la información codificada pueda ser enviada a través de los estados de encendido y apagado de los LED.

A la hora de seleccionar el dispositivo de conmutación de los LED, en este caso el transistor MOSFET, se encontraron los siguientes parámetros como

fundamentales a la hora de diseñar el prototipo: Primero los tiempos de respuesta del transistor, los cuales deben ser lo suficientemente pequeños para trabajar de manera adecuada con las señales que envía el microcontrolador; el segundo parámetro es la corriente máxima a través de drenaje y fuente la cual se debe escoger según la corriente máxima de polarización deseada para los LED con el objetivo de lograr la iluminación deseada.

Para el prototipo desarrollado se decidió utilizar el transistor IRF740, el cual tiene tiempos de respuesta inferiores a los 30 ns y una máxima disipación de potencia de 125 W; estas características muestran que el dispositivo permite cumplir los principios de diseño y además de ello permitiría funcionar con luces LED de alta potencia, tal como fue pensada la etapa de conmutación y amplificación. Aunque en principio se buscaba utilizar un transistor de menor potencia, tal como el IRF520 que presenta similares tiempos de respuesta y una máxima disipación de potencia de 40 W, la disponibilidad del dispositivo fue crucial a la hora de su selección, por lo cual se continuó con el primeramente mencionado.

**2.2.3 Etapa de recepción.** Se encarga de tomar y convertir las señales ópticas enviadas desde otro módulo VLC a señales de voltaje tratables por el microcontrolador y está compuesto por un fotodiodo y dos amplificadores operacionales.

**2.2.3.1 Fotodiodo.** Tiene la función de convertir las señales ópticas recibidas en señales eléctricas de corriente, permitiendo el flujo de corriente eléctrica en presencia de luz o impidiéndolo en ausencia de excitación óptica.

En el desarrollo del diseño de los módulos VLC se encontraron los parámetros principales que influyen en el funcionamiento del mismo: Ancho de banda espectral, el cual se refiere a las longitudes de onda a las cuales puede responder el dispositivo; sensibilidad espectral relativa, indica de qué manera responde el dispositivo para señales luminosas en las distintas longitudes de onda en las cuales puede operar; el ángulo de visión del fotodiodo, es el máximo ángulo respecto al centro del fotodiodo en el cual puede percibir cambios de luz; el último parámetro es el tiempo de respuesta, éste permite conocer la máxima frecuencia óptica a la cual puede ser enviada la información mediante los módulos VLC.

El dispositivo seleccionado para el diseño del prototipo implementado fue el fotodiodo PD 204-6C; los parámetros encontrados en la hoja de datos del dispositivo son: sensibilidad espectral relativa para las longitudes de onda del espectro de luz visible entre 0.5 y 0.8, ángulo de visión de 45 ° y tiempos de respuesta de 10 ns; aunque los parámetros del dispositivo cumplen con los principios de diseño buscados en cuanto a tiempos de respuesta, dichos tiempos no fueron alcanzados; en la sección 2.3.2 se muestra el desempeño real que se obtuvo con este dispositivo.

El ángulo de visión del dispositivo seleccionado, como ya se mencionó en la sección 2.2.2.1, es uno de los que hace que la calibración de línea de vista requiera de un nivel adecuado de precisión para el correcto funcionamiento del prototipo.

**2.2.3.2 Amplificadores operacionales.** En la etapa de recepción se dispone de dos amplificadores operacionales, uno de ellos funciona como conversor corriente a voltaje y es el encargado de tomar las señales de corriente entregadas por el fotodiodo, las cuales son del orden de los microamperios y las convierte en señales de voltaje del orden de los milivoltios; el segundo amplificador operacional funciona en modo amplificador no inversor, tomando las señales de voltaje entregadas por el primero y amplificándolas a niveles adecuados para luego ser interpretadas por el microcontrolador.

Se escogió realizar en etapas separadas la conversión de señales de corriente en señales de voltaje y su amplificación con el objetivo de no aumentar la resistencia de carga del fotodiodo; en la sección 2.3.2 se amplía la información respecto a dicha decisión.

En esta etapa, como en la de transmisión, se utilizaron amplificadores operacionales LF353, los cuales cumplen con las características especificadas para el desarrollo del prototipo.

**2.2.4 Etapa de procesamiento.** El dispositivo encargado del procesamiento en los módulos VLC del prototipo tiene tanto funciones relacionadas con la transmisión como con la recepción de los datos; en cuanto a transmisión, se encarga de tomar los datos a transmitir, codificarlos y mostrarlos a través de uno de sus puertos de salida de manera que dicha información llegue a los LED y pueda ser enviada.

Su función en la etapa de recepción es la de tomar las señales de voltaje entregadas por el arreglo de fotodiodo y amplificadores operacionales de dicha etapa y compararlas con un nivel de voltaje predeterminado con el objetivo de determinar si lo que recibe es un cero lógico (valores menores al voltaje predeterminado) o un uno lógico (valores mayores al voltaje predeterminado), para luego realizar la decodificación del mensaje recibido.

La selección del dispositivo microcontrolador que se utilizó para el desarrollo del prototipo se basó en los dispositivos mostrados en la tabla 4, sus características principales, disponibilidad y costo; cabe mencionar que dichos dispositivos son los utilizados por los proyectos mostrados como ejemplos de aplicación en el anterior capítulo.

**Tabla 4. Comparación de posibles sistemas de procesamiento del prototipo VLC.**

Dispositivo	Principales características	Disponibilidad	Costo aproximado en pesos colombianos
Atmega 328p	Máxima frecuencia de reloj de 20 MHz. Diferentes periféricos de comunicación, conversor A/D, comparadores y temporizadores. Bajo consumo de potencia. Programación en C/C++ y ensamblador. Empaquetado tipo SPDIP de 28 pines.	Inmediata	\$6.500
Mbed LPC1768 (ARM Cortex M3 core)	Máxima frecuencia de reloj de 96 MHz. Diferentes periféricos de comunicación + Ethernet, conversor A/D, conexión USB como host o dispositivo. Programación en C/C++. Módulo pequeño.	Importación desde Estados Unidos de América	\$156.000
Cortex-A9 a 1.5 GHz (Dispositivo android)	Máxima frecuencia de reloj de 1.5 GHz. Todos los periféricos presentes en un teléfono inteligente. Programación en Android.	Inmediata	\$150.000 - \$500.000
Sistema DE2 de altera (Cyclone II)	Máxima frecuencia de reloj de 50 MHz. Diferentes periféricos de comunicación + Ethernet, acceso a memoria expandible tipo SD, conversores A/D, comparadores, acelerómetros, temporizadores. Programación en diagramas esquemáticos y VHDL. Módulo de gran tamaño.	Importación desde Estados Unidos de América	\$600.000 (precio académico)
Atmega 2560	Máxima frecuencia de reloj de 16 MHz. Diferentes periféricos de comunicación, conversor A/D, comparadores y temporizadores. Bajo consumo de potencia. Programación en C/C++ y ensamblador. Empaquetado tipo TQFP de 100 pines.	Inmediata	\$40.000
Elaboración propia			

Basándose en la información expuesta en la tabla 4, se determinó que el dispositivo adecuado para el desarrollo del prototipo era el microcontrolador atmega328p de *Atmel corporation*, éste se seleccionó debido a que, frente a los

demás sistemas mostrados, presenta un costo bastante inferior, un menor tamaño y es de fácil adquisición.

Las principales características del dispositivo seleccionado que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del prototipo se listan a continuación:

- Máxima frecuencia de reloj de 20 MHz.
- Comparador analógico integrado.
- Bajo consumo de potencia (máximo 14 mA en modo activo a 20 MHz).
- 6 canales de conversión A/D con resolución de 10-bit.
- Puertos de comunicación (especialmente puerto serial).
- Tamaño del dispositivo (Empaquetado de 28-pin tipo DIP o tipo QFN y empaquetado 32-lead tipo TQFP).

En la sección 2.3.3 y 2.3.4 se trata acerca del uso de estas características en el diseño e implementación a nivel de software del prototipo desarrollado.

## **2.3 DISEÑO HARDWARE Y SOFTWARE DEL PROTOTIPO**

Como se ha mencionado anteriormente, los módulos VLC diseñados cuentan tanto con etapa de transmisión como con etapa de recepción, pero inicialmente, por facilidad de diseño, ambas etapas fueron diseñadas, probadas y ajustadas de manera individual antes de hacer parte de un solo dispositivo final.

A continuación se presentan los diseños hardware y software de las etapas principales de cada uno de los módulos que hacen parte del prototipo desarrollado.

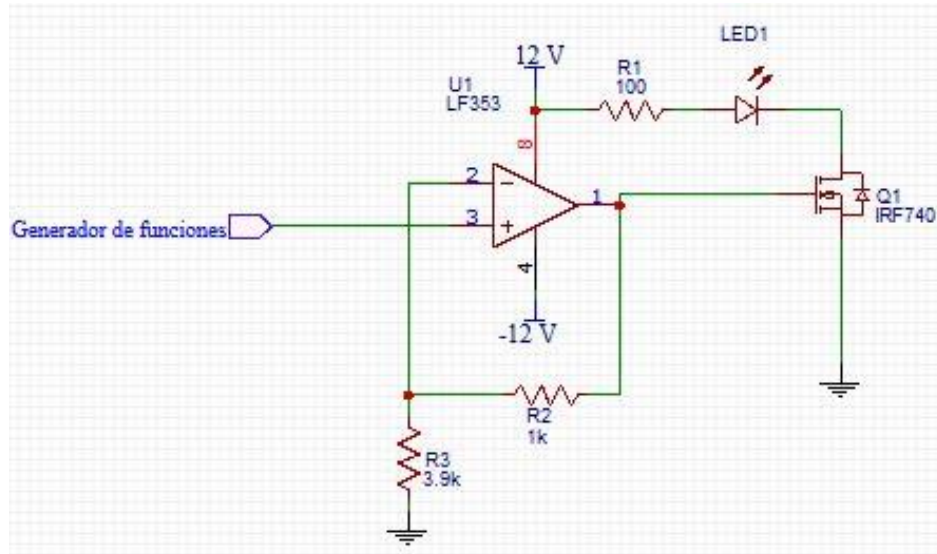
**2.3.1 Diseño hardware de la etapa de transmisión de los módulos VLC.** En los sistemas de comunicación basados en luz visible, la información se envía usando como método de transmisión, los cambios entre encendido y apagado de una fuente de luz. Como se explicó en la sección 1.2, existen distintos métodos de modulación y codificación que permiten realizar el envío de información mediante luz visible, uno de ellos es el conocido como modulación ON-OFF, el cual consiste en utilizar los estados de encendido y apagado de la fuente de luz para realizar la modulación de la información, este método combinado con uno de codificación conocido como codificación Manchester, el cual se explica en la sección anteriormente mencionada, fueron los métodos seleccionados para el desarrollo del prototipo basándose en la recomendación para PHY I del estándar IEEE 802.15.7.

Para lograr que las luces LED utilizadas en el prototipo enviaran la información ya codificada de manera adecuada, se diseñó un circuito que toma las señales



enviadas por el microcontrolador y las ajusta de manera que el LED varíe sus estados de encendido y apagado según el mensaje enviado desde la etapa de procesamiento.

Figura 2.3. Esquema inicial de la etapa de transmisión.



Elaboración propia

En la figura 2.3 se presenta el diseño inicial de la etapa de transmisión; durante las pruebas de funcionamiento de la etapa en cuestión se utilizó un generador de funciones para emular el comportamiento del microcontrolador; también se utilizó un amplificador operacional en configuración de amplificador no inversor para llevar la señal al nivel de voltaje requerido para que el transistor MOSFET pudiese suplir la cantidad de corriente necesaria según la potencia de los LED utilizados para transmitir.

A continuación, se presenta los cálculos de diseño de la etapa de amplificación y conmutación, los cuales fueron pensados para suplir una corriente de 4 A:

Para que el dispositivo opere en la zona óhmica se debe cumplir:

$$V_{GS} > V_{TH} \quad (3)$$

^

$$0 < V_{DS} < V_{GS} - V_{TH} \quad (4)$$

Se conoce que para el dispositivo utilizado  $V_{TH} = 4 \text{ V}$  y que  $R_{DS(on)} = 0.55 \Omega$

Es posible calcular el valor de  $V_{DS}$  para el valor de corriente máxima propuesta en el diseño; suponiendo que  $V_{GS} > V_{TH}$ , es decir que el dispositivo conduce, se tiene:

$$V_{DS} = 4 \text{ A} * 0.55 \Omega = 2.2 \text{ V} \quad (5)$$

Si se soluciona la desigualdad (4) para  $V_{GS}$ ; se tiene que:

$$V_{GS} > V_{DS} + V_{TH} = 2.2 \text{ V} + 4 \text{ V} = 6.2 \text{ V} \quad (6)$$

Lo anterior muestra que con un valor de  $V_{GS} > 6.2 \text{ V}$  es posible suplir la corriente de 4 A que se propone como máxima corriente para el diseño, además de ello se garantiza que el dispositivo funciona en su zona de operación óhmica.

La ganancia para el amplificador no inversor mostrado en la figura 2.3 se calculó de la siguiente manera:

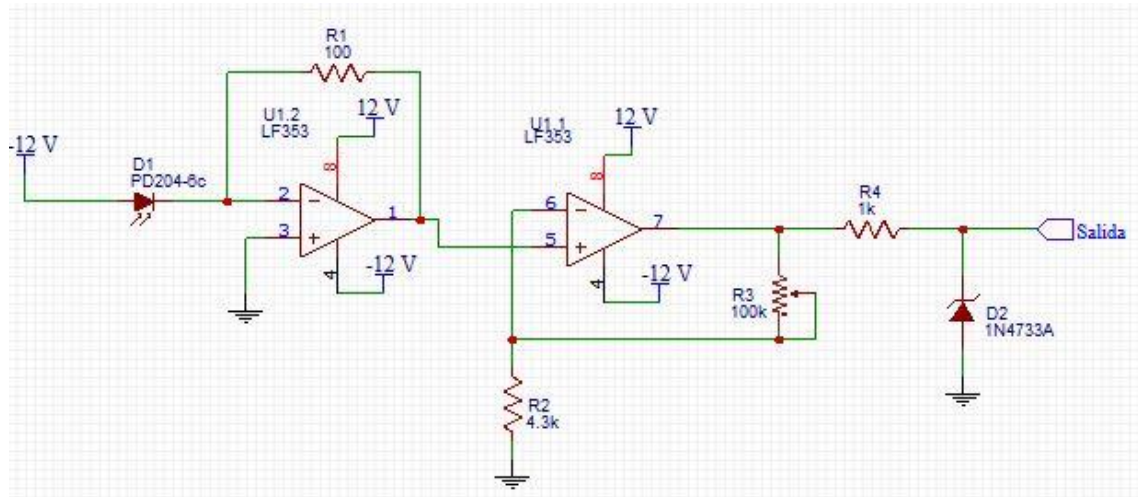
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{6.2 \text{ V}}{5 \text{ V}} = 1.24 = 1 + \frac{R2}{R3} \quad (7)$$

Solucionando la ecuación 7 se encontraron los valores comerciales adecuados para  $R2$  y  $R3$ .

Para probar el funcionamiento de los elementos que componen la etapa de transmisión se realizó una prueba inicial en la que se envió una onda cuadrada de 10 kHz y 5 V de amplitud con el fin de observar y ajustar la amplificación del circuito y así garantizar que el transistor MOSFET entrara en conducción para tener la corriente deseada circulando por el LED.

**2.3.2 Diseño hardware de la etapa de recepción de los módulos VLC.** La etapa de recepción se encarga de convertir la señal óptica que percibe el fotodiodo y entregarla al microcontrolador como una señal de voltaje que varía entre 0 y 5 V.

Figura 2.4. Esquema inicial de la etapa de recepción.



Elaboración propia

La figura 2.4 muestra el diseño de la etapa de recepción de los módulos del prototipo, donde se muestran los elementos que se utilizaron para garantizar el comportamiento deseado por parte de la etapa.

En la figura, el fotodiodo se encarga de recibir las señales de luz, permitiendo el flujo de corriente eléctrica a través de sus terminales y hacia el amplificador operacional U1.2 del circuito integrado LF353, dicho amplificador se encuentra funcionando como convertor corriente a voltaje.

Figura 2.5. Señal recibida por el fotodiodo a distintas distancias de la fuente de luz.



Elaboración propia

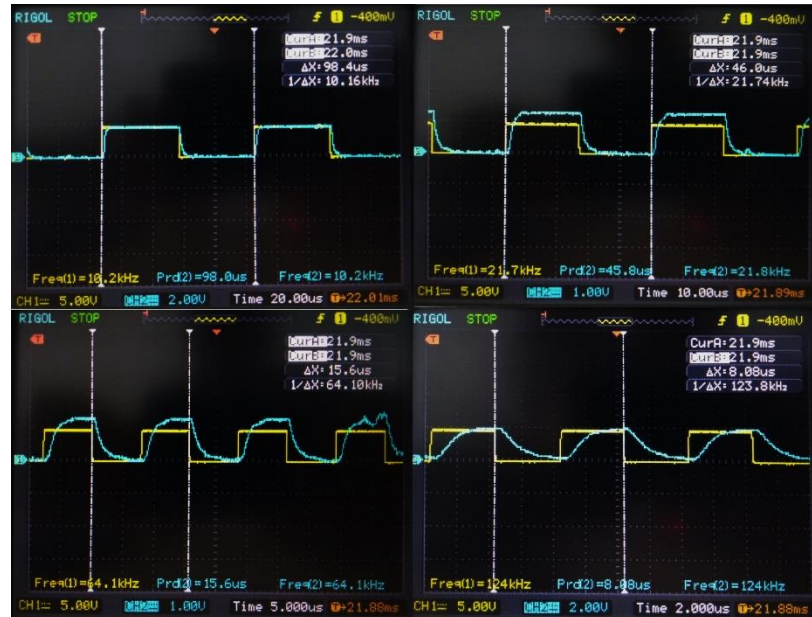
El voltaje entregado por el amplificador U1.2, se envía al amplificador U1.1, el cual funciona como amplificador no inversor; durante la prueba de esta etapa del prototipo se utilizó una resistencia variable con el fin de encontrar la amplificación necesaria para lograr polarizar el diodo Zener, fijando así a la salida un voltaje de 5.1 VDC en el estado “ON” del transmisor.

Las pruebas de diseño de esta etapa se realizaron encendiendo un diodo LED con una señal cuadrada a diferentes frecuencias y a dos distancias distintas de separación entre el led y el fotodiodo, esto con el objetivo de conocer la respuesta de los elementos de la etapa, principalmente del fotodiodo, ante estas variables.

Como se evidencia en la figura 2.5, la cantidad de corriente que el fotodiodo permite pasar a través de sus terminales depende directamente de la distancia a la que se encuentra la fuente de luz, a mayor distancia, el fotodiodo percibe menos cantidad de luz proveniente del transmisor; con ayuda de la resistencia variable se encontró el valor que permite tener una ganancia tal que el prototipo funciona de manera adecuada para un rango de distancias determinado.

También se realizó una prueba que consistió en hacer que la luz conmutara a distintas frecuencias (10 kHz, 22 kHz, 64 kHz y 124 kHz) para así observar la respuesta temporal de la etapa de recepción.

Figura 2.6. Respuesta del fotodiodo a distintas frecuencias.



Elaboración propia

Como se evidencia en la figura 2.6, a frecuencias mayores a 60 kHz, la respuesta del fotodiodo ya no es similar a la señal que hace conmutar el LED, es una versión distorsionada de la señal de luz original; lo anterior es una de las principales limitaciones del prototipo diseñado, puesto que la máxima frecuencia de conmutación óptica se limita; por lo tanto, la tasa de transmisión máxima que puede alcanzar el sistema también se ve limitada.

El montaje para la prueba mencionada consistió en un arreglo en serie fotodiodo-resistor en el cual la polarización fue de 12 V y el voltaje de salida se midió en la resistencia de 100  $\Omega$  utilizada. La conmutación de la luz se logró con un LED blanco a 5 cm de distancia del fotodiodo, alimentado con un generador de funciones; durante la prueba se corroboró que el LED funcionara correctamente a frecuencias mayores a 100 kHz descartando así que fuese el causante de la baja respuesta temporal.

Se consideraron las posibles capacitancias parasitas que pudieron aumentar los tiempos de respuesta del fotodiodo de la siguiente manera: Capacitancia de entrada del osciloscopio de 18 pF, capacitancia de las puntas del osciloscopio de máximo 115 pF.

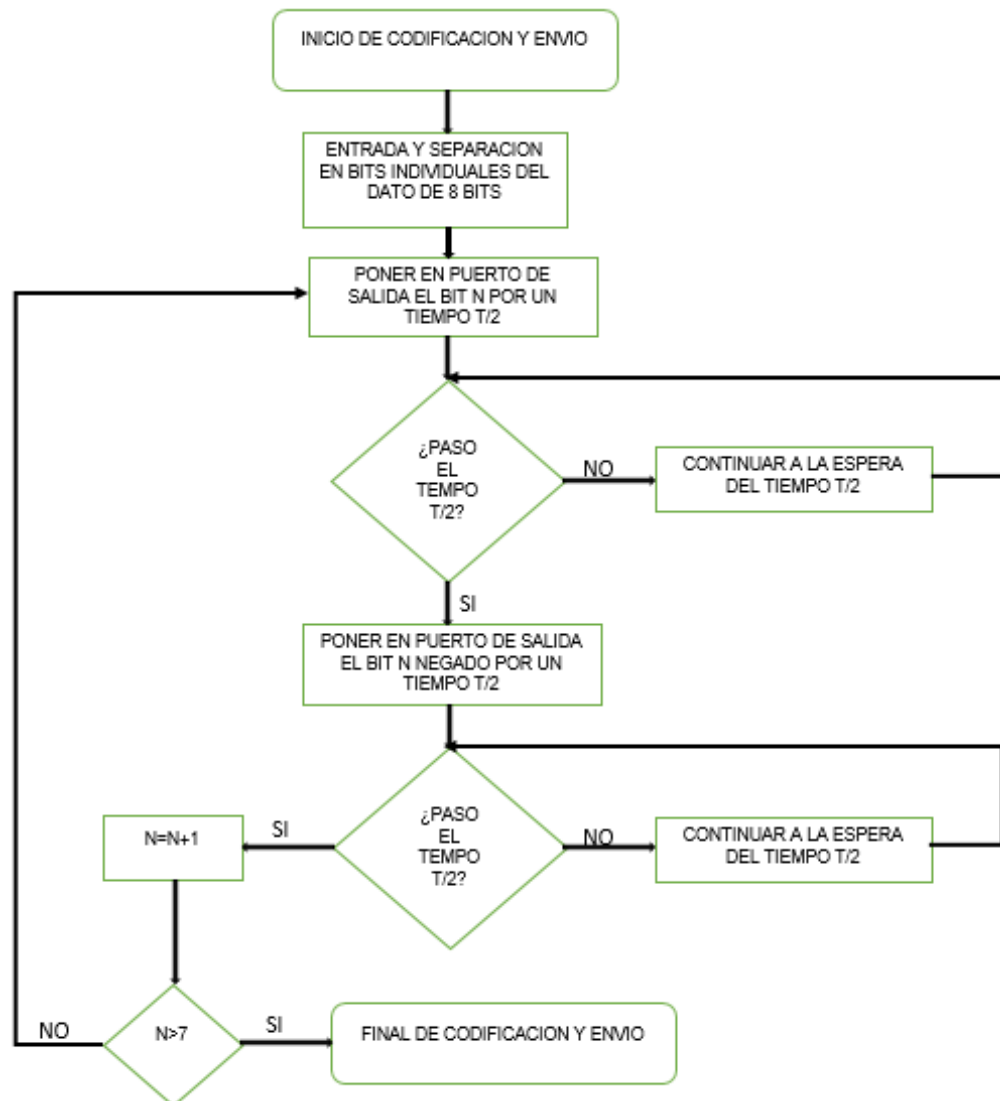
La constante de tiempo teniendo en cuenta que la capacitancia propia del fotodiodo que es de 10 pF y la resistencia utilizada de 100  $\Omega$ , se puede calcular así:

$$\tau = 100 \Omega * (115 \text{ pF} + 18 \text{ pF} + 10 \text{ pF}) = 14.3 \text{ ns}$$

Aun adicionando el efecto de las capacitancias anteriormente mencionadas en la constante de tiempo para el circuito de prueba del fotodiodo, no se ve justificada la respuesta temporal obtenida en las pruebas mostradas en la figura 2.6; lo anterior lleva a pensar que el fotodiodo utilizado no puede responder a los tiempos mencionados 10 ns o que el dispositivo no es el de la referencia esperada.

**2.3.3 Diseño de software de la etapa de transmisión.** Como se mencionó anteriormente, el método de codificación seleccionado para el diseño del prototipo es la codificación Manchester, el software diseñado para la etapa de transmisión buscó realizar la codificación mencionada sobre datos de 8 bits y luego mostrarlos de forma serial a la salida de uno de los puertos del microcontrolador.

Figura 2.7. Diagrama de flujo de la etapa de transmisión



Elaboración propia

En la figura 2.7 se presenta el diagrama de flujo que describe el proceso de codificación y envío de los datos a transmitir mediante el módulo. El microcontrolador seleccionado cuenta con distintos periféricos que pueden ser integrados a la etapa de transmisión, entre ellos los puertos de comunicación o los canales de conversión A/D; en el prototipo desarrollado es posible utilizar el puerto de comunicación serial como fuente de los datos a transmitir y también es posible generar los datos a enviar mediante código dentro del microcontrolador, este último fue el método usado para realizar las distintas pruebas de validación del prototipo, esto se describirá con mayor énfasis en el capítulo 3.

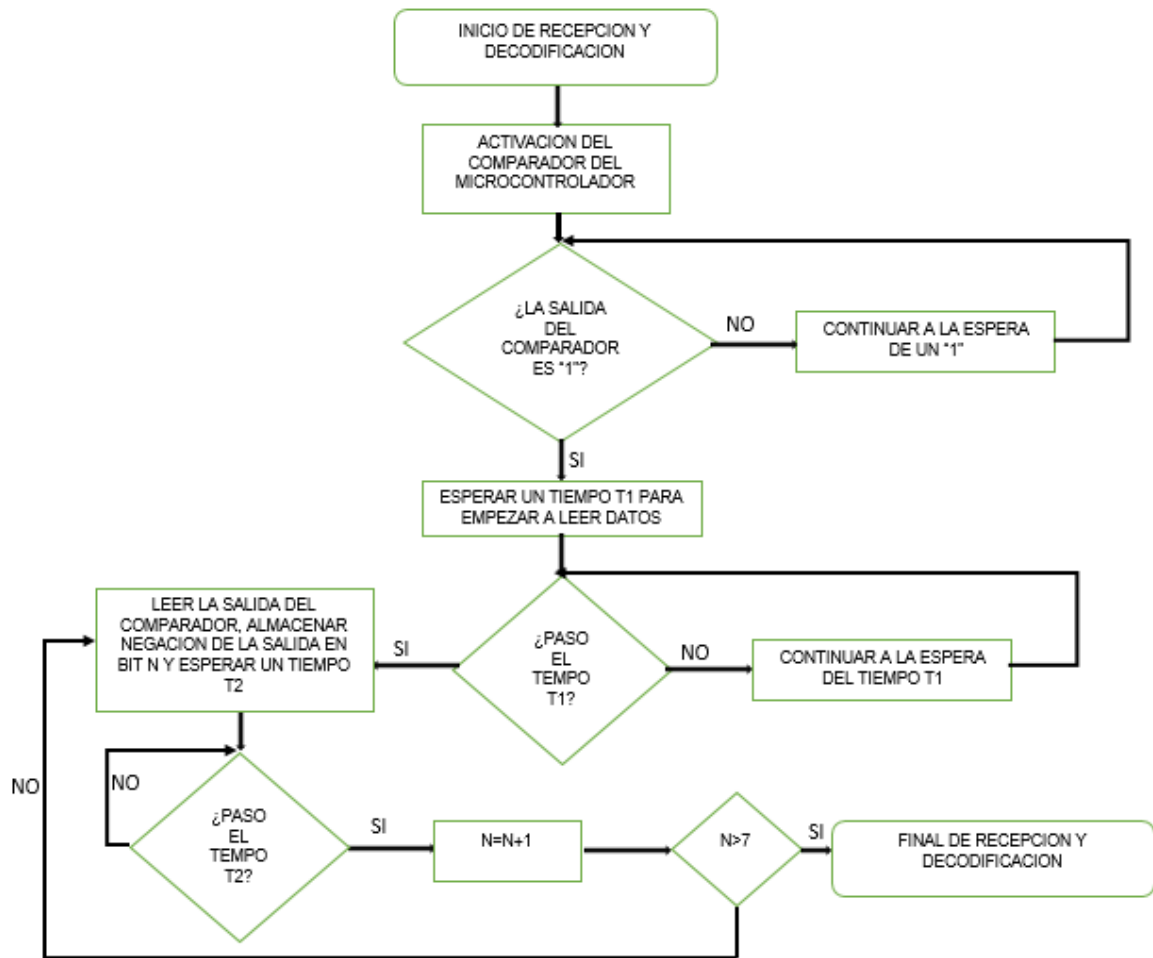
Luego de obtener el dato de 8 bits a enviar con uno de los métodos disponibles en el prototipo, se realiza una secuencia de código que permite separar el dato en cada uno de los bits que lo componen, luego de ello se logra la codificación Manchester haciendo que cada bit (en el algoritmo se hace referencia al bit N, iniciando con  $N=0$ , es decir el bit menos significativo) y su complemento sean mostrados uno tras otro en uno de los puertos de salida del microcontrolador durante un tiempo  $T/2$ , estos tiempos son logrados mediante el uso de retardos en el código programado en el microcontrolador. En el caso del prototipo desarrollado los datos se envían al puerto "B" y son mostrados de forma serial en el bit menos significativo del puerto mencionado.

El tiempo de duración total de un bit ya codificado es de T segundos, donde el tiempo T es el mismo periodo de conmutación de los LED, el cual varía según la tasa de transmisión a la cual se configure el módulo.

Cabe mencionar que antes de enviar cada grupo de 8 bits se antepone un estado alto en el pin de salida con una duración  $T_{inicial}$  que varía según la tasa de transmisión utilizada, este tiempo tiene como propósito ser una ayuda para realizar la sincronización con la etapa de recepción, tal como se explica en la siguiente sección.

**2.3.4 Diseño de software de la etapa de recepción.** La tarea a realizar por parte del microcontrolador en la etapa de recepción es la decodificación del mensaje recibido. En la figura 2.8 se presenta el diagrama de flujo del proceso de decodificación. En la etapa de recepción se utilizaron dos de los periféricos disponibles en el microcontrolador, el puerto de comunicación serial y el comparador analógico.

Figura 2.8. Diagrama de flujo de la etapa de decodificación.

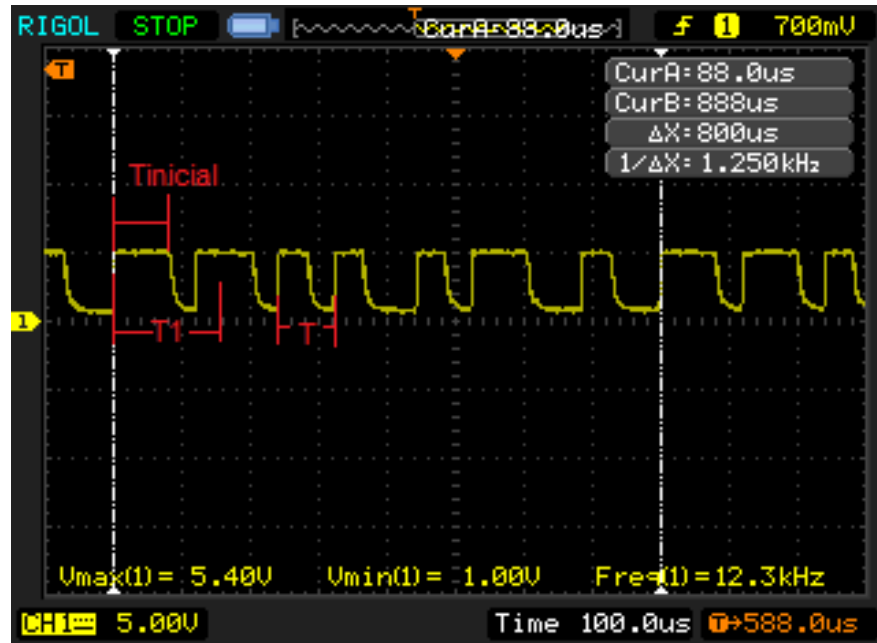


Elaboración propia

El comparador analógico integrado del microcontrolador puede usarse para comparar una señal análoga entrante por el pin 13 con una referencia de voltaje interna o bien puede compararse con otra señal entrante por el pin 12; en este caso se decidió usar un voltaje umbral externo de 4.1 VDC en el pin 12, con el objetivo de que la salida del comparador entre en estado alto cuando la señal a comparar sea mayor que el umbral mencionado.



Figura 2.9. Señal recibida y su decodificación



Elaboración propia

En la figura 2.9 se muestra un ejemplo de los tiempos que se tienen en cuenta al realizar la decodificación sobre una señal recibida por la etapa correspondiente del módulo VLC; la señal recibida es un dato de 8 bits a una tasa de transmisión de 10 kbps.

El tiempo T1 corresponde a un tiempo de alineación del periodo de lectura del dato recibido y tiene una duración cercana a  $T + T_{inicial}$ , donde  $T_{inicial}$  es un tiempo que se usa para que el microcontrolador sepa que va a recibir un mensaje y T, que en este caso es el mismo T2 mostrado en el diagrama de flujo de la decodificación, es el tiempo de duración de un bit ya codificado.

La decodificación implementada y que se muestra en el diagrama de flujo de la figura 2.8 ocurre entonces de la siguiente manera: el microcontrolador recibe una señal que le indica que empiece la decodificación una vez que el comparador pone su salida en estado alto por primera vez, luego se espera un tiempo T1 y se realiza la lectura del primer bit del dato recibido, la lectura de los bits codificados ocurre unos microsegundos antes del final de su periodo de duración, por lo tanto basándose en la manera en que se interpretan los bits en codificación Manchester, el complemento de la salida del comparador indicará el bit recibido ya decodificado; por último se repite la lectura de la salida del comparador cada T segundos hasta que se hayan leído los 8 bits.

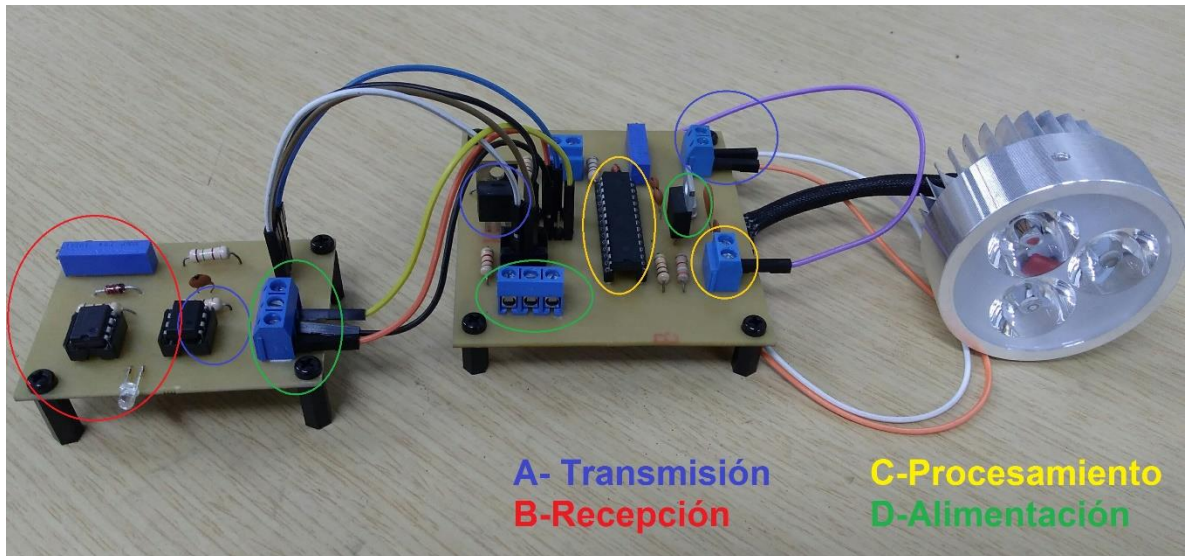
Al tener los bits ya decodificados, éstos se unen en una sola variable de 8 bits; como se mencionó, el puerto serial del microcontrolador es utilizado en la etapa de



4.1 VDC que se implementa con un diodo Zener modelo 1N4731A y el cristal externo de 20 MHz que utiliza el microcontrolador para su funcionamiento a máxima frecuencia de reloj.

La implementación final del prototipo se muestra en la figura 2.11, en ella se señalan las distintas etapas que componen cada módulo VLC; “A” corresponde a la etapa de transmisión, “B” a la etapa de recepción, “C” a la etapa de procesamiento y “D” a la etapa de alimentación. En la figura se muestran dos borneras además de las de alimentación, una hace parte de la etapa de procesamiento y corresponde al puerto serial del microcontrolador y la restante está designada para conectar los LED que se utilizan como elemento transmisor.

Figura 2.11. Implementación final de los módulos VLC.



Elaboración propia

Como bien se ha mencionado, se implementaron dos módulos VLC, ambos con capacidad de funcionar como transmisor y receptor en un espacio de tiempo dado, esto permitió que el sistema de comunicación desarrollado pudiese funcionar en dos modos distintos, *simplex* y *half-duplex*.

En la sección anterior se presentó la manera en que los módulos transmiten y reciben información tanto a nivel de hardware como a nivel de software; si uno de los módulos es configurado mediante el microcontrolador asociado a éste para trabajar como modulo transmisor y el otro modulo es configurado como receptor únicamente, entonces se tiene el funcionamiento en modo *simplex* del sistema de comunicación desarrollado; cuando ambos módulos desarrollan la tarea de transmitir y recibir datos, entonces el sistema se encuentra en configuración *half-duplex*.

En el modo *simplex*, el módulo transmisor enviará los datos que se asignen para ello mediante uno de los métodos de obtención de datos presentes en el prototipo; el módulo receptor permanece de manera constante a la espera de los datos a recibir.

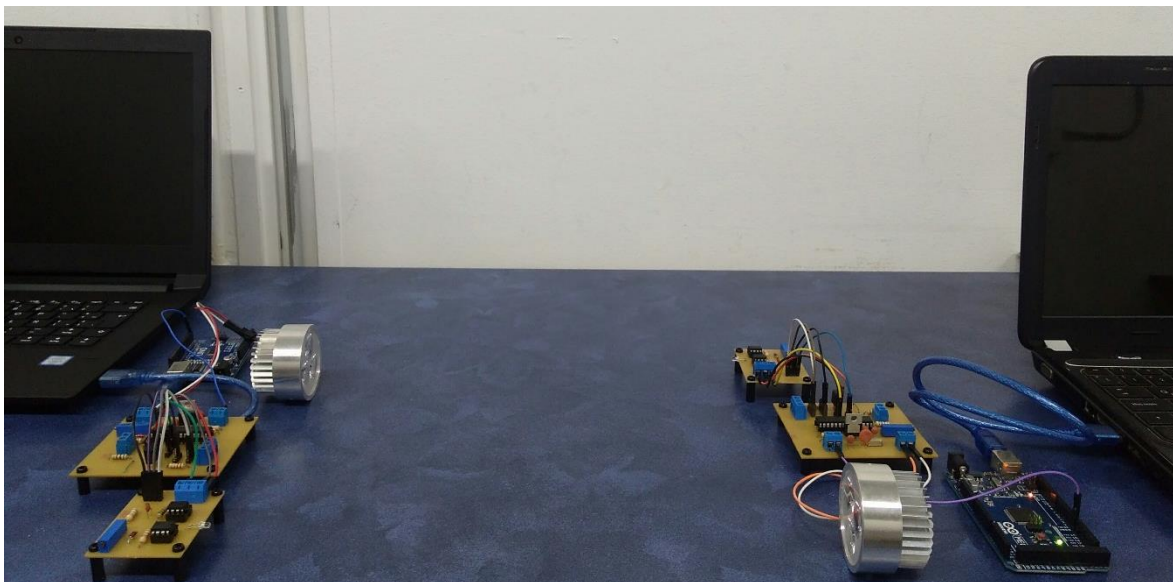
En el modo *half-duplex*, ambos módulos envían y reciben datos, con este fin, los módulos se turnan de manera organizada para realizar la transmisión y recepción. Uno de los módulos se configura para tener prioridad a la hora de empezar la comunicación, haciendo así que éste inicie primero transmitiendo, es decir que estará ejecutando el proceso descrito en la figura 2.7, durante ese mismo instante de tiempo, el módulo sin prioridad inicia en modo de recepción, ejecutando el proceso de decodificación descrito en la figura 2.8, luego de haber enviado el dato de 8 bits, el módulo con prioridad sale del proceso de codificación y envío y entra en el de decodificación y recepción, lo contrario ocurre con el módulo sin prioridad, el cual se dispone a enviar los datos que tenga para ello; el proceso descrito se repite un número de veces igual a la cantidad de datos que ambos módulos tengan por enviarse.

A este documento se anexan los códigos fuente de los módulos en sus dos modos de funcionamiento, en él se especifica la manera en que pueden variarse las maneras de ingresar datos a los módulos y la variación de los tiempos  $T_{inicial}$ ,  $T$  y  $T_1$  que se encargan de modificar las tasas de transmisión; cabe resaltar que la tasa de transmisión alcanzada por los módulos en modo *half-duplex* también dependerá de unos tiempos de espera que se programaron para realizar la sincronización entre los momentos de transmisión y recepción, esta información se amplía en la sección 3.1.2 del siguiente capítulo.

### 3. VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO Y PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN

En este capítulo se describen las distintas pruebas que se realizaron con el objetivo de validar el funcionamiento del prototipo y caracterizar su funcionamiento con respecto a las distintas variables que interactúan en el sistema desarrollado.

Figura 3.1. Disposición de los módulos VLC para las distintas pruebas realizadas.



Elaboración propia

En la figura 3.1 se muestra la disposición de ambos módulos VLC en el momento de realizar las pruebas, en todos los casos probados, la configuración fue la misma, variando únicamente la distancia de separación entre los módulos. En la figura se observa que a cada computador lo acompaña un módulo Arduino, estos simplemente cumplen la función de ser conversores USB-SERIAL mediante los cuales se logra hacer uso de la conexión serial disponible entre los PC y los módulos VLC.

#### 3.1 PRUEBAS DE VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO

El prototipo desarrollado permite una configuración en dos modos de funcionamiento, estos son *simplex* y *half-dúplex*; con el objetivo de validar el funcionamiento general del sistema en ambos modos, se realizaron dos pruebas de validación, una para cada modo de funcionamiento.



El escenario y los procedimientos mediante los cuales se realizaron las pruebas de validación tanto para el modo *simplex* como *half-duplex* se describen a continuación.

Las pruebas se realizaron en una habitación de 3.35 metro de ancho \* 10.7 metros de largo, para un área total de 35,85 metros cuadrados, la habitación es iluminada por 12 lamparas de tubo tipo LED modelo “9290002848” del fabricante *philips*, las características de dichas lamparas son: 120 centímetros de largo, potencia de 16 W, 1600 lumen de salida y ángulo de radiación de 150°.

La disposición de los módulos dentro de la habitación intentó ser lo más central posible con respecto a las fuentes de luz ambiente con las que contaba la misma; en las pruebas de validación ambos módulos se ubicaron a una distancia de separación de 50 cm.

Con el objetivo de monitorear la conexión serial entre los módulos VLC y los computadores, se utilizó una terminal de comunicación serial denominada *Termite 3.3* de la compañía *compu-phase*, la cual es software de uso y distribución libre, para configurar la recepción serial en los computadores y así lograr observar los datos recibidos durante el proceso de comunicación.

La configuración del protocolo de comunicación serial utilizado fue: Tasa de transmisión de 250 kbps, 8 bits de datos y 1 bit de parada, sin bits de paridad.

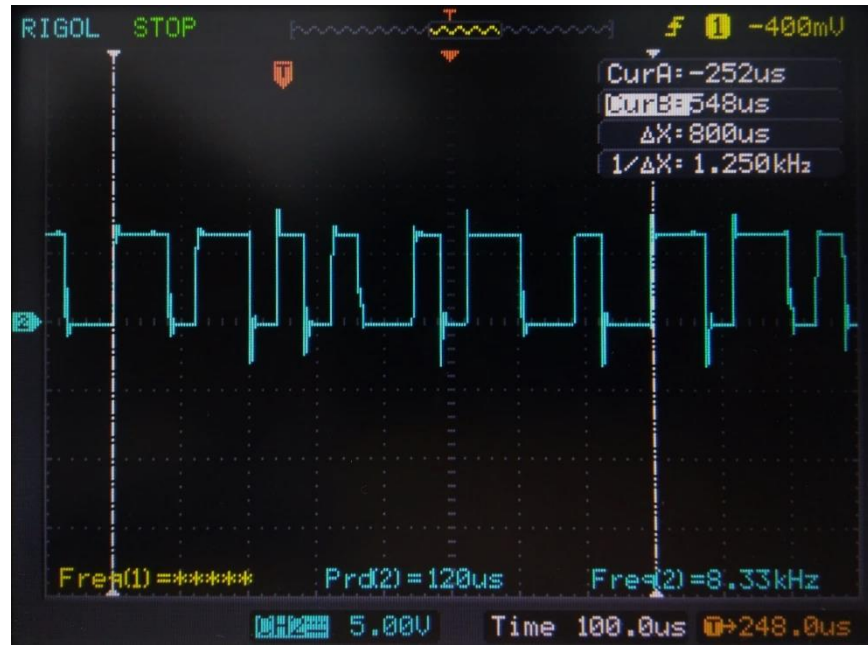
Luego de tener ambos módulos en la posición deseada y habiendo alineado los LED y fotodiodos se enciende el sistema y se realizan las mediciones y comparaciones correspondientes a cada modo de funcionamiento que validan el sistema de comunicación, tal como se describe en las siguientes secciones.

**3.1.1 Validación del sistema de comunicación en modo simplex.** Para la prueba de validación de este modo de funcionamiento, el microcontrolador correspondiente al módulo transmisor se configuró para enviar de manera repetitiva el carácter “N”, dicho caracter corresponde en código ASCII al dato binario de 8 bits “0b01001110”.

Para el modo *simplex*, la tasa de transmisión se fijó en 10 kbps, a dicha tasa de transmisión cada bit codificado tiene una duración 80 us, lo cual sugiere una frecuencia de conmutación óptica de 12.5 kHz, frecuencia a la cual ya había sido demostrado que el fotodiodo funciona de manera adecuada, tal como se presentó en la sección 2.3.2.

Con el fin de corroborar que el sistema se comportaba de la manera esperada se comprobaron primeramente las señales enviadas y recibidas por los módulos respectivamente.

Figura 3.2. Señal enviada por uno de los módulos VLC en configuración simplex.



Elaboración propia

La figura 3.2 muestra, en color azul, la señal enviada desde uno de los módulos VLC, esta corresponde a los niveles de voltaje que controlan la modulación de los LED, es decir su transición entre el estado encendido y apagado para poder realizar el envío del dato codificado.

En la figura 3.2 se presenta la medición del tiempo que toma enviar los 8 bits codificados que forman el carácter enviado "N".

$$Tasa\ de\ transmisión = \frac{cantidad\ de\ bits\ enviados}{Tiempo\ que\ toma\ transmitir\ los\ bits}$$

$$Tasa\ de\ transmisión = \frac{8\ bits}{800\ us} = 10\ \frac{kbit}{s} \quad (8)$$

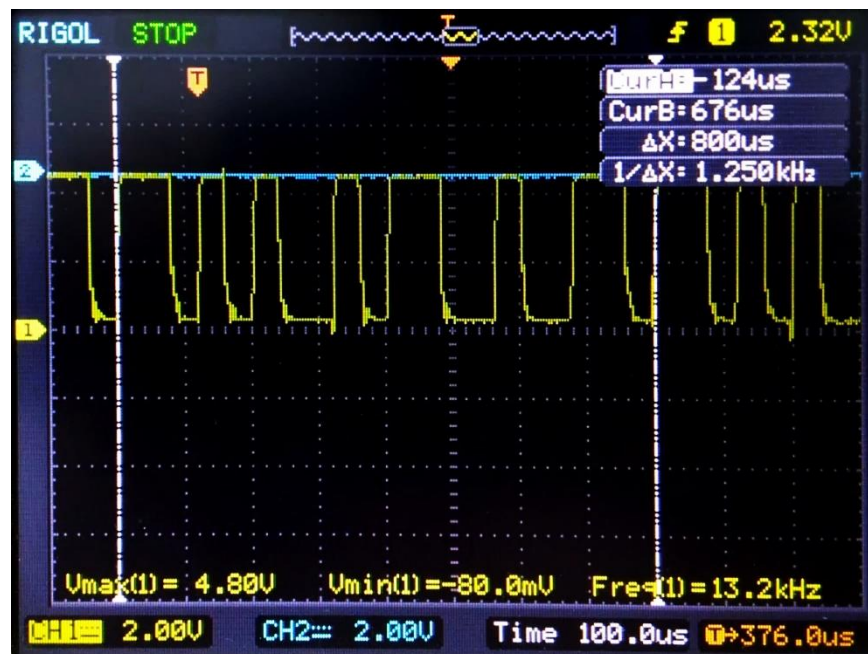
Utilizando la ecuación (1) es posible calcular que la tasa de transmisión, en la muestra presentada corresponde a 10 kbps, la cual es la tasa de transmisión que se escogió para realizar la prueba de validación

Se comparó la señal de salida mostrada con lo esperado según el comportamiento descrito en la sección 2.3.3 y se encontró que el módulo transmisor realiza su función de la manera deseada, enviando el carácter "N", el cual fue el dato

programado para ser enviado. En la figura 3.2 se puede observar, también, que los niveles de voltaje mostrados corresponden a los bits del carácter enviado ya codificado en Manchester, lo descrito anteriormente permite validar el correcto funcionamiento a nivel de hardware y software de la etapa de transmisión de los módulos VLC.

Luego de comprobar el funcionamiento de la etapa de transmisión en configuración *simplex*, se procedió a observar la manera en que esta señal era adquirida por el módulo que hacía las veces de receptor.

Figura 3.3. Señal recibida por uno de los módulos VLC.



Elaboración propia

Como se muestra en la figura 3.3, la señal obtenida por la etapa de recepción del módulo VLC y que se envía hacia su correspondiente etapa de procesamiento, corresponde en forma y tiempo a la señal enviada por el otro módulo, además de ello se comprobó que la señal esperada por el microcontrolador posee los niveles de voltaje adecuados para su posterior captura y decodificación.

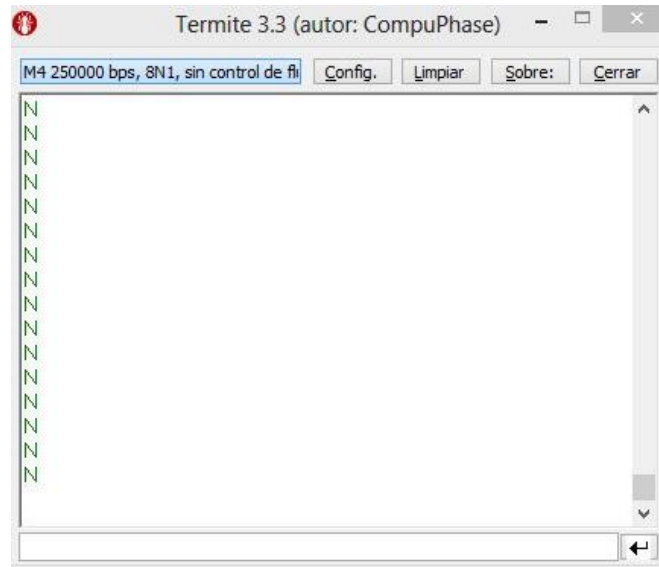
Al igual que en el transmisor, en la señal adquirida es posible identificar que los bits recibidos corresponden a la codificación Manchester del carácter enviado, esto tan solo permite validar el funcionamiento a nivel de hardware de la etapa de recepción en los módulos VLC.

Para corroborar que la decodificación y el adecuado funcionamiento a nivel de software de la etapa de recepción se aprovechó la conexión serial existente entre



los módulos VLC y un computador, esto para ver en tiempo real los datos decodificados por el módulo. En la figura 3.4 se muestra que el dato recibido por el módulo es exactamente el esperado.

Figura 3.4. Datos decodificados por el módulo VLC.



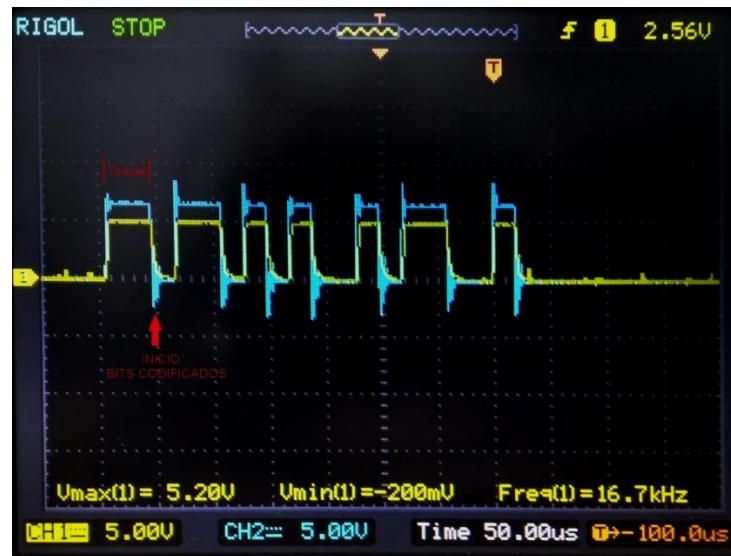
Elaboración propia

**3.1.2 Validación del sistema de comunicación en modo half-duplex.** Para validar el funcionamiento en modo *half-duplex* del prototipo desarrollado, se configuraron los módulos VLC para funcionar como transmisores y receptores; el módulo con prioridad para iniciar la comunicación se configuró para enviar de manera repetida el carácter "N" al igual que en la prueba de modo *simplex*; el segundo módulo se configuró para enviar el carácter "M", este corresponde en código ASCII al dato binario de 8 bits, "0b01001101".

Para el modo *half-duplex*, la tasa de transmisión también fue fijada en 10 kbps, pero en este caso al utilizarse la misma ventana de tiempo para recepción y decodificación, cada bit ya codificado tiene una duración de 40 us, por lo cual se requirió de una mayor frecuencia de conmutación óptica, la cual fue 25 kHz.

Con el fin de corroborar que el sistema se comportaba de la manera esperada, se comprobaron las señales enviadas y recibidas por cada uno de los módulos VLC.

Figura 3.5. Señal enviada por el módulo VLC 1 y recibida por el módulo VLC 2.



Elaboración propia.

En la figura 3.5 se muestra, en color azul, la señal enviada por el módulo con prioridad de transmisión, en la imagen se muestra, además, en color amarillo la señal recibida por el segundo módulo. Se aprecia en la figura la superposición de ambas señales, con ello se comprueba que tanto señal enviada como recibida coinciden. Se puede comprobar que los bits enviados corresponden a la codificación del carácter “N”, estos inician justo donde se muestra en la figura.

Figura 3.6. Señal enviada por el módulo VLC 2 y recibida por el módulo VLC 1.



Elaboración propia

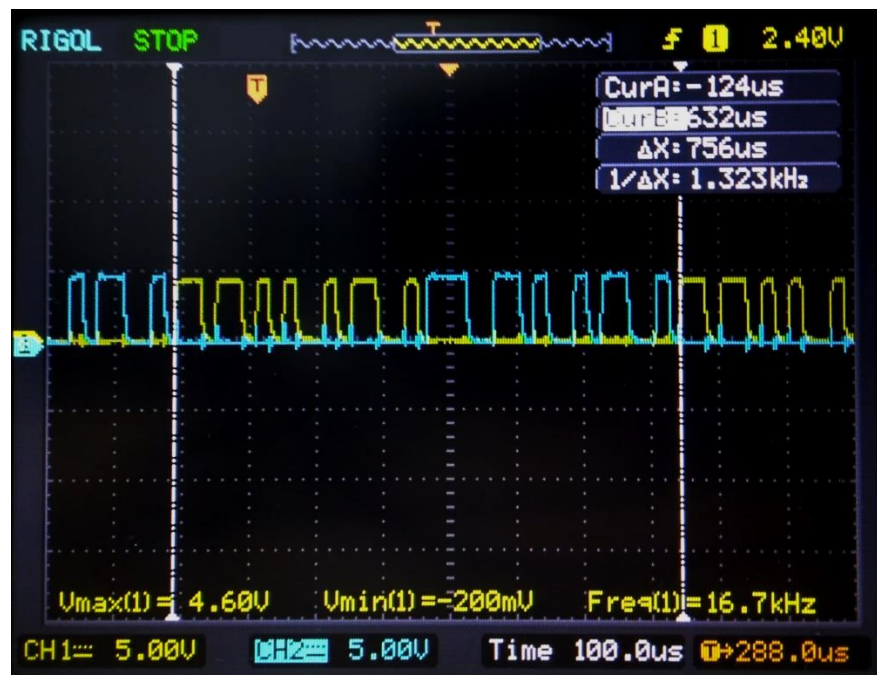
Las señales mostradas en la figura 3.6 corresponden a los bits enviados por el módulo 2, el cual no tiene prioridad de inicio de transmisión, ésta se muestra en color amarillo y, en color azul, se muestra la señal que recibe el módulo 1; como se observa en la figura, la similitud de las señales demuestra que el envío y recepción se realizó de manera correcta.

Se puede determinar que los bits enviados por el módulo 2 corresponden a la codificación Manchester del carácter enviado, "M".

Con lo presentado en las figuras 3.5 y 3.6 es posible afirmar que, a nivel de hardware, las etapas de transmisión y recepción funcionan según lo esperado en ambos módulos

Para mostrar el funcionamiento a nivel de software, se presenta la figura 3.7, en ella se muestra la manera en que son administrados los tiempos de envío y recepción por ambos módulos.

Figura 3.7. Tiempos de recepción y envío en el modo *half-duplex*.



Elaboración propia

La figura 3.7 muestra las señales recibidas por cada uno de los módulos, en ésta se logra apreciar la manera en que se distribuye el tiempo para que ambos módulos puedan realizar sus procesos de transmisión y recepción de manera adecuada.

El tiempo medido con los cursores del osciloscopio, tal como se muestra en la figura, corresponde a 756 us, éste es el tiempo utilizado por cada uno de los

módulos para enviar y recibir un dato de 8 bits, es decir que utilizando de nuevo la ecuación (8), se logra mostrar que la tasa de transmisión es de 10kbps, tal como se configuró en esta prueba.

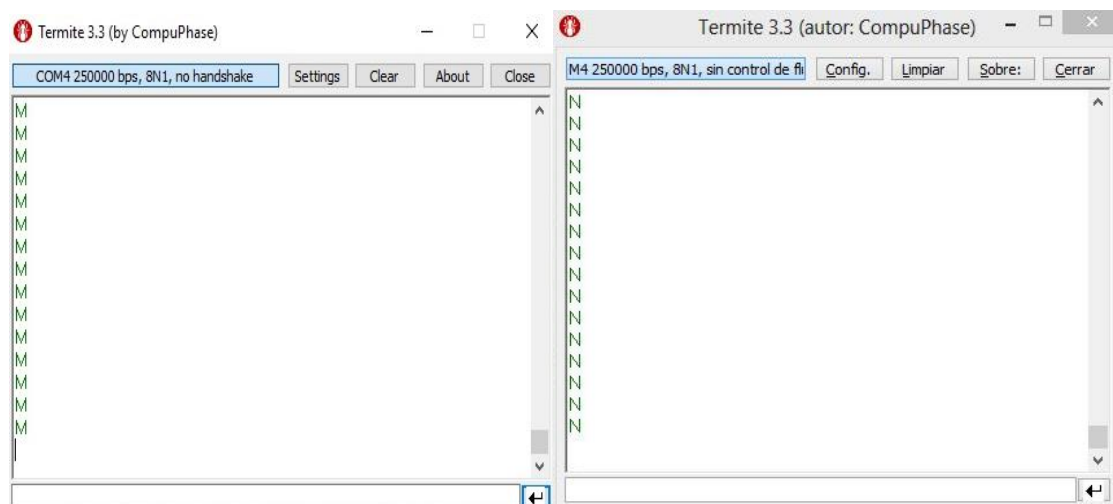
La señal de color azul corresponde a la recibida por un módulo y la amarilla pertenece al otro módulo, lo que sucede en la figura es lo siguiente: Tomando como ejemplo el tiempo medido con los cursores del osciloscopio, durante la primera mitad del periodo de transmisión-recepción, uno de los módulos envía datos, es decir que en ese momento la señal recibida por él mismo es 0 V (señal de color azul), en ese momento el segundo módulo recibe los datos enviados por el primero (señal de color amarillo), luego, en la segunda mitad del periodo sucede lo contrario.

En la figura 3.7 se evidencia que al momento en que un módulo realiza su transmisión el otro permanece apagado, esto sucede puesto que para los alcances del prototipo desarrollado no se vio necesario incluir una etapa de control de iluminación, pero es totalmente posible incluirla sin que afecte el proceso de comunicación, ya sea manteniendo un nivel de polarización constante para los LED durante la recepción, o utilizando métodos de control de dimming como el PWM.

Como se mencionó antes, la frecuencia de conmutación óptica en esta prueba fue de 25 kHz, esto debido a que para lograr enviar y recibir datos de 8 bits en el mismo tiempo que tarda el modo simplex en tan solo realizar el envío, los diodos LED deben conmutar a una frecuencia de casi el doble para lograr la transmisión de la información.

Con el objetivo de corroborar la correcta decodificación de los datos por parte de ambos módulos, se utilizó la conexión serial entre PC y módulos.

**Figura 3.8. Datos decodificados por los módulos VLC.**



Elaboración propia

Ambos módulos realizaron la decodificación correcta de los datos enviados, tal y como se muestra en la figura anterior; esto permite validar el correcto funcionamiento tanto a nivel de software como de hardware del sistema de comunicación desarrollado en funcionamiento en modo *half-duplex*.

### 3.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO.

Con el objetivo de comprender la manera en que las distintas variables que pueden interactuar con el prototipo desarrollado afectan su funcionamiento, se realizó un grupo de pruebas que las tuviesen en cuenta para su posterior análisis. En esta sección se describe la manera en que se realizaron dichas pruebas, los distintos escenarios y las características de configuración de los módulos del prototipo.

Al igual que en las pruebas de validación, las pruebas para caracterizar el prototipo se realizaron en la habitación descrita con anterioridad en la sección 3.1.

**Tabla 5. Variables estudiadas para la caracterización del prototipo.**

Variable Estudiadas	Unidades de medida	Símbolo
Tasa de transmisión	Kilobit por segundo	[kbit/s]
Distancia entre módulos	Metros	[m]
Niveles de iluminación	Lumen por metro <sup>2</sup>	[lx]
Potencia de transmisión	Watt	[W]
Tasa de error de bit	Adimensional	---
<b>Elaboración propia</b>		

**3.2.1. Configuración de los módulos VLC.** Como se ha mencionado en anteriores secciones, es posible cambiar la tasa de transmisión del sistema de comunicación desarrollado, modificando los tiempos que interactúan en el envío y recepción de los datos.

En las pruebas de validación se mostró el funcionamiento tanto en modo *simplex* como *half-duplex* a una tasa de transmisión de 10 kbps; para las pruebas de caracterización del prototipo se escribieron dos nuevos códigos fuente para cada

uno de los modos de comunicación del prototipo, estos corresponden a dos nuevas tasas de transmisión.

Para el modo *simplex*, se escribieron códigos fuente que permiten configurar la tasa de transmisión a 25 kbps o a una tasa de 50 kbps; en este caso, las frecuencias de conmutación óptica son de 33 kHz y 62.5 kHz respectivamente.

Para el modo *half-duplex* se agregaron dos nuevos códigos fuente que permiten probar su funcionamiento con una tasa de transmisión de 23 kbps o 40 kbps, para ello, se utilizaron unas frecuencias de conmutación óptica de 56 kHz y 100 kHz respectivamente.

**3.2.2 Tasa de transmisión vs distancia entre los módulos.** Para estudiar la dependencia de la tasa de transmisión alcanzable por el prototipo respecto a la distancia, se realizó una prueba que incluyese cambios en estas dos variables, manteniendo constantes el resto de ellas.

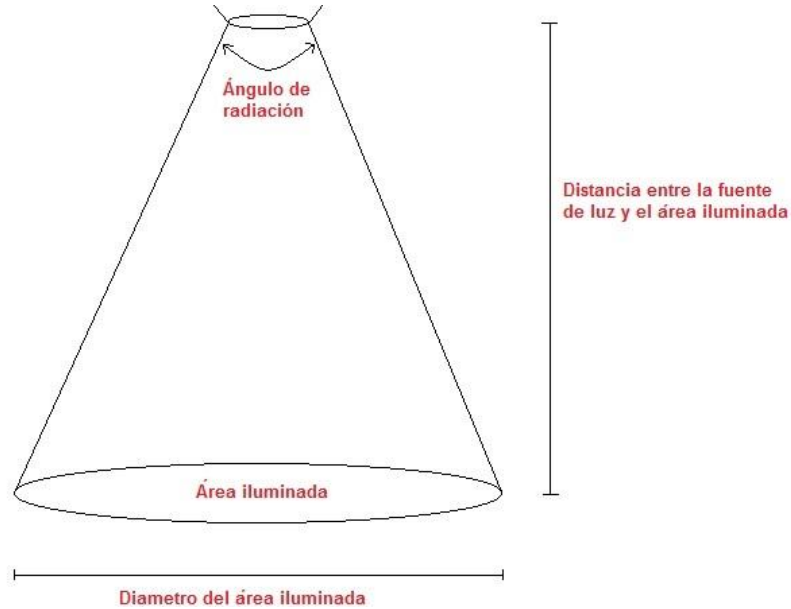
Las pruebas se realizaron para todas las tasas de transmisión disponibles en el modo de funcionamiento *simplex*; la distancia en las pruebas fue variada con intervalos de 0.5 m, siendo ésta la distancia inter-módulo inicial y dejando como máxima distancia de separación la distancia a la cual el receptor no pudiese responder de la manera adecuada, es decir cuando las señales recibidas no alcanzaban los niveles de 5 V necesarios para su correcta lectura por parte de la etapa de procesamiento.

Para esta prueba las condiciones de las demás variables se mantuvieron de la siguiente manera: iluminación ambiente artificial de 0 lx, es decir, sin iluminación ambiente artificial y potencia de transmisión total de 0.9 W, lo que según la hoja de datos de las luces LED utilizadas, da como resultado un flujo luminoso de 108 lm.

Como base para la validación de la prueba se utilizó la tasa de error de bit, es decir que para cada una de las tasas de transmisión y distancias en ambos modos de funcionamiento se tomaron los datos necesarios para calcular el porcentaje de bits erróneos que se recibieron en total durante la transmisión, logrando tener un parámetro claro con el cual comparar el funcionamiento del prototipo al modificar las variables bajo estudio.

**3.2.3 Tasa de transmisión vs niveles de iluminación ambiente.** La dependencia de la tasa de transmisión respecto a los niveles de iluminación ambiente fue estudiada con una prueba que consistió en transmitir información usando el prototipo desarrollado bajo dos niveles de iluminación distintos.

Figura 3.9. Esquema para el cálculo de los niveles de iluminación.



Elaboración propia

Como se encontró en [5], es posible calcular los niveles de iluminación en un área determinada cuando se conoce el flujo luminoso y el ángulo de radiación de una fuente de luz, esto puede hacerse utilizando la ecuación (2).

$$\text{Nivel de iluminacion} = \frac{\text{Flujo luminoso}}{\text{Área iluminada}} \quad (9)$$

De la ecuación (9) es conocido el flujo luminoso de cada luminaria utilizada para generar luz ambiente en la habitación donde se realizaron las pruebas; para encontrar el área iluminada, es necesario recurrir a unos cálculos extra que se muestran a continuación:

$$\text{Radio del area} = \tan\left(\frac{\text{Ángulo rad.}}{2}\right) * (\text{Distancia fte. de luz y área}) \quad (10)$$

Con la ecuación (10) es posible calcular el radio del área iluminada; luego, con ayuda de la ecuación (11) se puede calcular finalmente dicha área.

$$\text{Área iluminada} = \pi * \text{radio}^2 \quad (11)$$

Es posible entonces determinar el nivel de iluminación sobre los módulos VLC generado por los focos de luz ambiente en la habitación haciendo uso de las ecuaciones descritas, así:

$$\text{Radio del area} = \tan\left(\frac{150^\circ}{2}\right) * (2 \text{ m}) = 7,46 \text{ m}$$

$$\text{Área iluminada} = \pi * (7,46 \text{ m})^2 = 175 \text{ m}^2$$

Con los cálculos anteriores y tomando en cuenta la disposición de las luces dentro de la habitación, en la cual las luminarias se dividen en tres grupos de 4 tubos LED, cada uno distribuidos de manera uniforme a lo largo del espacio de pruebas; un grupo se encuentra al lado izquierdo de la habitación, otro en el centro y el ultimo al lado derecho de la misma; considerando el largo de cada tubo LED, se hará la suposición de que los dos tubos tanto del ala izquierda como derecha más alejados del centro de la habitación no aportan iluminación al lugar donde se encuentran los módulos: por lo tanto se puede decir que el nivel de iluminación debido la fuente de luz ambiente sobre los módulos VLC es de:

$$\text{Nivel de iluminacion} = \frac{8 * 1600 \text{ lm}}{175 \text{ m}^2} = 73,14 \text{ lx}$$

La prueba se realizó en ambos modos de funcionamiento del prototipo, con todas las tasas de transmisión disponibles, primero con una iluminación de 0 lx y luego con 73,14 lx sobre el receptor; al igual que en la prueba anterior, se utilizó la tasa de error de bit para tener un punto de comparación del funcionamiento del prototipo al momento de ser modificada cada variable bajo estudio.

Las condiciones de las demás variables durante la prueba fueron las siguientes; distancia inter-módulos 1.5 m y potencia de transmisión 0.9 W para un flujo luminoso total de transmisión de 108 lm.

**3.2.4 Distancia entre los módulos vs potencia de transmisión.** La potencia de transmisión en este caso es la misma potencia disipada por los LED en el momento de transmitir los datos y es posible modificarla al variar la corriente que llega a los diodos emisores de luz.

Esta prueba se realizó para estudiar la dependencia de la distancia entre los módulos respecto a la potencia de transmisión, para ello se transmitieron una



cantidad de bits determinada a una tasa de transmisión fija para ambos modos de funcionamiento, variando la potencia de transmisión total entre 0.9 W para un flujo luminoso de 108 lm, 1.5 W para un flujo luminoso de 180 lm y 2.97 W para un flujo luminoso total de 356 lm; la distancia también fue variada, cada 0.5 m hasta alcanzar el límite de distancia para cada potencia de transmisión.

Las condiciones de las variables restantes al momento de la prueba fueron, tasa de transmisión en modo *simplex* 50 kbit/s, en modo *half-duplex* 23 kbit/s, iluminación ambiente de 0 lx.

Al igual que en las demás pruebas, ésta se basó en la tasa de error de bit para lograr una comparación del funcionamiento del prototipo bajo cada escenario estudiado.

**3.2.5 Prueba de funcionamiento sin lente óptico.** Con el objetivo de estudiar el comportamiento del sistema desarrollado al retirar el lente óptico de los LED que forman parte de la etapa de transmisión, se propuso realizar una prueba basada en la tasa error de bit; el modo de funcionamiento en esta prueba fue el modo *simplex*, con una tasa de transmisión de 10 kbit/s, potencia de transmisión de 0.9 W y niveles de iluminación ambiente de 0 lx. Para la prueba se varía la distancia desde 0.5 metros hasta la máxima distancia de separación entre los módulos a la cual puedan responder de manera adecuada.

**3.2.6 Tasa de error de bit.** Como se puede observar a lo largo de la sección 3.2 de este documento, todas las pruebas de caracterización del prototipo desarrollado se basan en la utilización de la prueba de tasa de error de bit. Esta prueba consiste en determinar el número de bits erróneos que se reciben en una transmisión de un número definido de bits, la relación entre estas cantidades representa la tasa de error de bit.

$$Tasa\ de\ error\ de\ bit = \frac{Cantidad\ de\ bits\ que\ llegaron\ incorrectamente}{Cantidad\ de\ bits\ enviados} \quad (12)$$

La ecuación (12) muestra de qué manera puede ser calculada la tasa de error de bit. Para el caso del prototipo desarrollado, las tasas de transmisión no superan los 50 kbit/s, basándose en la recomendación O.150 de la unión internacional de las telecomunicaciones [24], la cual trata sobre los requisitos para la instrumentación de mediciones de la calidad de funcionamiento de equipos de transmisión digital, se determinó la manera en que debían realizarse las pruebas para determinar la tasa de error de bit.

Según la recomendación mencionada, para equipos con una tasa de transmisión como la del prototipo desarrollado, la prueba debe realizarse enviando una

secuencia pseudo-aleatoria generada por un registro de desplazamiento de 11 etapas, en la cual las salidas de las etapas 9ª y 11ª se envían a una compuerta XOR para luego ser realimentada a la entrada del registro de desplazamiento.

Con esta configuración de registros de desplazamiento es posible generar 2.047 bits pseudo-aleatorios según [24], para hacer posible el uso de la secuencia en el estudio de la tasa de error de bit del prototipo desarrollado, se agregó una función capaz de generar dicha secuencia de 2.047 bits aleatorios al código de programación de los módulos VLC.

Con la secuencia generada se formaron grupos de 8 bits que se utilizaron como dato a enviar, con este generador de secuencias es posible tener 2.047 grupos de 8 bits aleatorios, que dependen de la semilla que se dé al generador de secuencia.

Para el generador de secuencia implementado dentro del código de los módulos, la semilla fue “0b00110011101” y para formar los grupos de 8 bits a enviar se tomaron los 8 bits menos significativos.

A este documento se anexa el código que se usó para implementar el generador de secuencia y una lista de los 2.047 grupos de 8 bits aleatorios generados.

Conociendo la secuencia de bits pseudo-aleatorios enviada por los módulos VLC durante cada prueba, es posible determinar la tasa de error de bit tomando los datos recibidos y comparándolo con la base de datos de la secuencia generada. En código se permitió a cada transmisor enviar los 2.047 datos aleatorios de 8 bits más nuevamente los 3 primeros datos generados por el registro de desplazamiento, para un total de 16.400 bits enviados en cada prueba.

Fue posible conocer y almacenar los datos recibidos en cada prueba gracias a la conexión serial existente entre los módulos VLC y un PC, los datos recibidos se compararon con los enviados con la ayuda de una hoja de cálculo y distintas funciones proporcionadas por la misma, las hojas de cálculo utilizadas se anexan a este documento con el fin de corroborar los resultados mostrados en el capítulo de análisis y resultados.

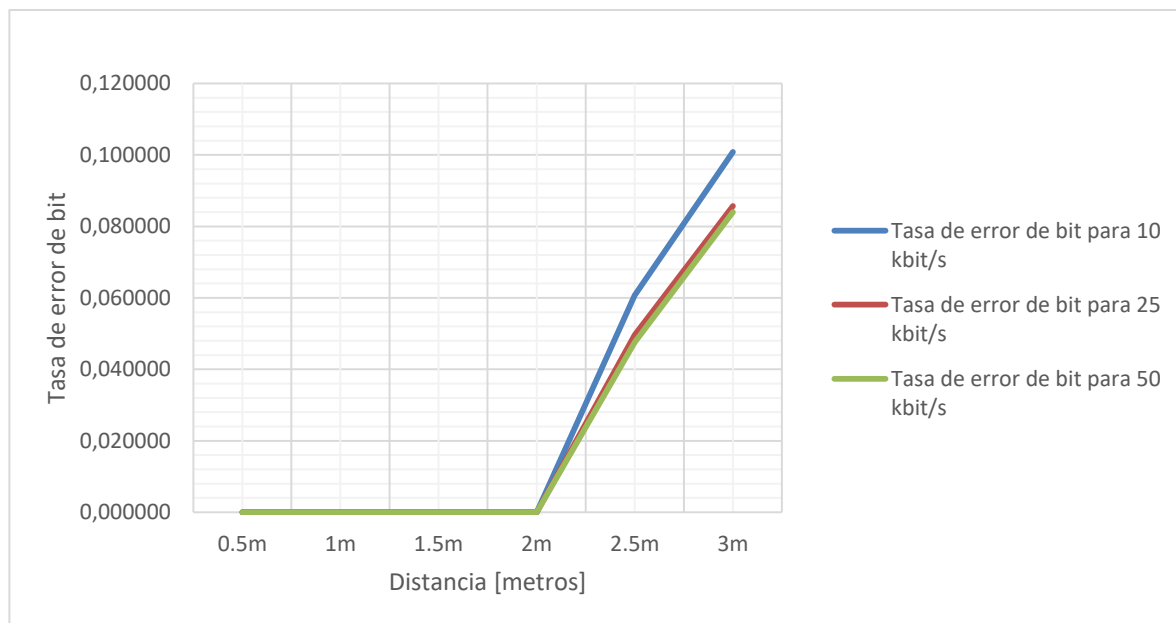
## 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al implementar las pruebas de caracterización descritas con anterioridad en el pasado capítulo, además de ello se presenta el análisis que permite describir el funcionamiento del prototipo desarrollado con respecto a las principales variables con las que interactúa.

### 4.1. TASA DE TRANSMISIÓN VS DISTANCIA

Los resultados obtenidos al realizar la prueba de tasa de transmisión vs distancia se muestran en la figura 4.1, donde se presentan las tasas de error de bit calculadas para el modo de funcionamiento simplex a diferentes tasas de transmisión y distancias.

**Figura 4.1. Tasa de error de bit en el modo simplex con variación de las tasas de transmisión y las distancias inter-módulo.**



**Elaboración propia.**

En la figura 4.1 se puede observar que para las tasas de transmisión probadas no llegan bits erróneos hasta superarse una distancia inter-módulo de 2 metros; además de ello, por las curvas obtenidas, se puede ver que el comportamiento de la tasa de error de bit no varía significativamente con los cambios en la tasa de transmisión, lo cual se corrobora con la tabla 6, donde se muestran dichos valores.

**Tabla 6. Tasa de error de bit en la prueba de tasas de transmisión vs distancia.**

Distancia [m]	BER a 10 kbps	BER a 25 kbps	BER a 50 kbps
0.5	0	0	0
1	0	0	0
1.5	0	0	0
2	0	0	0
2.5	0.060732	0,049634	0,047561
3	0.100854	0,085671	0,083963
<b>Elaboración propia.</b>			

Como se observa en la tabla 6, la diferencia entre las tasas de error de bit medidas, no supera el 1,6 %, lo cual es un buen indicativo para decir que la tasa de transmisión no se ve afectada de manera relevante por la distancia de separación existente entre los módulos y viceversa, es decir que el uso de tasas de transmisión bajas no implica una mayor separación máxima inter-módulo. Claramente al superarse cierta distancia (para esta prueba 3 metros), los errores superan el 10% y los módulos ya no reciben de manera adecuada los datos enviados, esto no tiene relación con la tasa de transmisión, sino con el flujo luminoso percibido por el fotodiodo de la etapa de recepción, fenómeno que fue explicado en la sección 2.3.2.

#### **4.2. TASA DE TRANSMISIÓN VS NIVELES DE ILUMINACIÓN**

En esta prueba se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 7; cómo se puede observar, para la mayoría de tasas de transmisión, en ambos modos de funcionamiento, *simplex* y *half-duplex*, la tasa de error de bit es del 0 %, lo que nos indica que los niveles de iluminación ambiente bajo los cuales se probó el prototipo no afectan su comportamiento.

La no influencia de la iluminación externa en el comportamiento del prototipo era esperada, esto debido a dos razones, la primera es que la luz ambiente que ilumina la habitación donde se realizaron las pruebas solo agrega un bajo nivel de DC que no alcanza a superar el umbral de comparación usado en la etapa de recepción de los módulos VLC.

La segunda razón es la disposición de los módulos dentro de la habitación; como se mencionó en la sección 2.2.3.1, el ángulo de visión del fotodiodo utilizado es de 45°, presentando su eficiencia máxima de conversión luz a corriente a los 0°, es decir en línea de visión directa, las luces de la habitación de pruebas forman ángulos mayores a 45 ° respecto a la posición del fotodiodo en los módulos VLC, haciendo así que la luz percibida por éste sea despreciable.

Tabla 7. Tasa de error de bit en la prueba de tasas de transmisión vs niveles de iluminación.

Modo de funcionamiento	Tasa de transmisión	Nivel de iluminación: 0 lx	Nivel de iluminación: 109 lx
<b>Simplex</b>	10 kbit/s	0	0
	25 kbit/s	0	0
	50 kbit/s	0	0
<b>Half-duplex</b>	10 kbit/s	0	0
	23 kbit/s	0	0
	40 kbit/s	0.498353	0.498353
Elaboración propia			

Además de lo anteriormente mencionado, se encontró que para el modo *half-duplex*, a una tasa de transmisión de 40 kbit/s, la tasa de error de bit es cercana al 50 % para ambos niveles de iluminación; este comportamiento se debe a la manera que responde la etapa de recepción a frecuencias de conmutación óptica mayores a 64 kHz, tal como se mencionó en la sección 2.3.2. Lo anterior muestra que no existe una relación considerable entre la tasa de transmisión y los niveles de iluminación ambiente, pero sí muestra una relación directa entre los tiempos de respuesta del fotodiodo usado en la etapa de recepción y la máxima tasa de transmisión alcanzable con el prototipo desarrollado.

#### 4.3 DISTANCIA INTER-MÓDULO VS POTENCIA DE TRANSMISIÓN

Según la hoja de datos de los LED utilizados para la etapa de transmisión, el aumento o disminución de la potencia consumida por las luminarias tiene una relación directa con el flujo de iluminación.

Las figuras 4.3 y 4.4 presentan la manera en que varía la tasa de error de bit para cada modo de funcionamiento, *simplex* y *half-duplex* respectivamente, a distintas distancias de separación entre los módulos VLC al cambiar la potencia de transmisión, es decir, al cambiar el flujo luminoso de los LED.

Los resultados obtenidos muestran la relación existente entre el nivel de iluminación percibido por el fotodiodo en los receptores y la máxima distancia que puede alcanzarse con errores menores al 2%.

Para las distintas potencias de transmisión, 0.9 W, 1.5 W y 2.97 W se tiene que el flujo de iluminación es de 108 lm, 180 lm y 356 lm respectivamente, se puede calcular entonces los niveles de iluminación percibidos por el fotodiodo para cada valor de potencia usado en la prueba y cada valor de distancia; dichos cálculos se

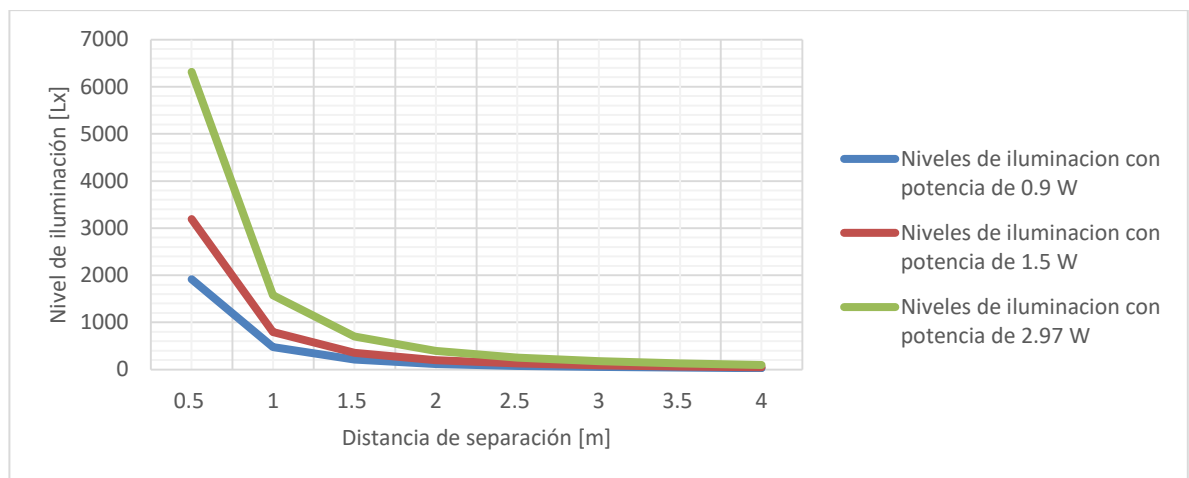
logran con ayuda de las ecuaciones 10, 11 y 9 mencionadas en la sección 3.2.3 del capítulo anterior, con las cuales se calculan respectivamente el radio del área iluminada, el área iluminada y el nivel de iluminación.

**Tabla 8. Niveles de iluminación a distintas distancias y potencias de transmisión.**

Distancia entre los módulos VLC	Niveles de iluminación de 0.9 W	Niveles de iluminación de 1.5 W	Niveles de iluminación de 2.97 W
0.5 m	1915,26 lx	3192,10 lx	6313,28 lx
1 m	478,82 lx	798,02 lx	1578,32 lx
1.5 m	212,80 lx	354,68 lx	701,48 lx
2 m	119,70 lx	199,50 lx	394,58 lx
2.5 m	76,61 lx	127,68 lx	252,53 lx
3 m	53,20 lx	88,67 lx	175,37 lx
3.5 m	39,08 lx	65,15 lx	128,84 lx
4 m	29,92 lx	49,87 lx	98,64 lx
Elaboración propia.			

La figura 4.2 y la tabla 8 presentan de manera gráfica y textual los resultados obtenidos de los cálculos mencionados, en las cuales se presenta la relación existente entre los niveles de iluminación y la separación entre transmisor y receptor para cada valor de potencia utilizado.

**Figura 4.2. Niveles de iluminación vs distancia de separación entre módulos.**



Elaboración propia.

Como ejemplo de la manera en que se obtuvieron estos valores, se presenta el cálculo del primer valor mostrado en la tabla 8 para una potencia de 0.9 W y distancia de separación de 0.5 m:

$$\text{Radio del área iluminada} = \tan\left(\frac{30^\circ}{2}\right) * (0,5 \text{ m}) = 0,133 \text{ m}$$

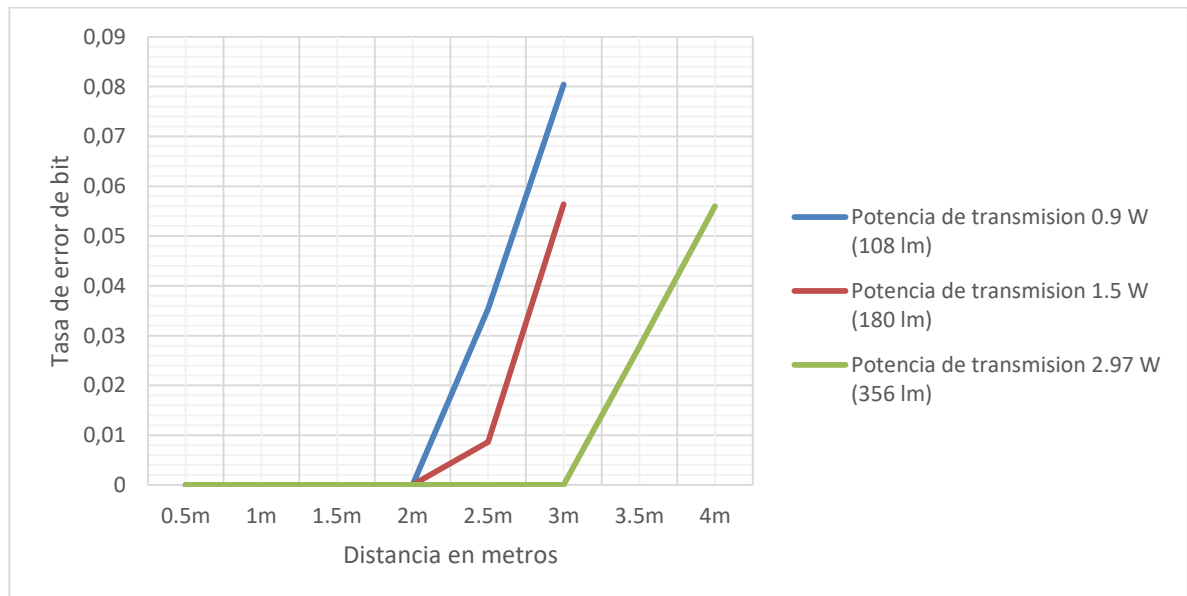
$$\text{Área iluminada} = \pi * (0,133 \text{ m})^2 = 0,056 \text{ m}^2$$

$$\text{Nivel de iluminación} = \frac{108 \text{ lm}}{0,056 \text{ m}^2} = 1915,26 \text{ lx}$$

En las ecuaciones anteriores, el valor de 30° corresponde al ángulo de radiación de los LED usados con lente óptico.

Las tasas de error de bit para las distintas potencias de transmisión utilizadas tanto para los modos de funcionamiento *simplex* como *half-duplex* son presentados en las figuras 4.3 y 4.4 respectivamente.

**Figura 4.3. Tasa de error de bit para distintas potencias de transmisión en modo *simplex*.**



**Elaboración propia.**

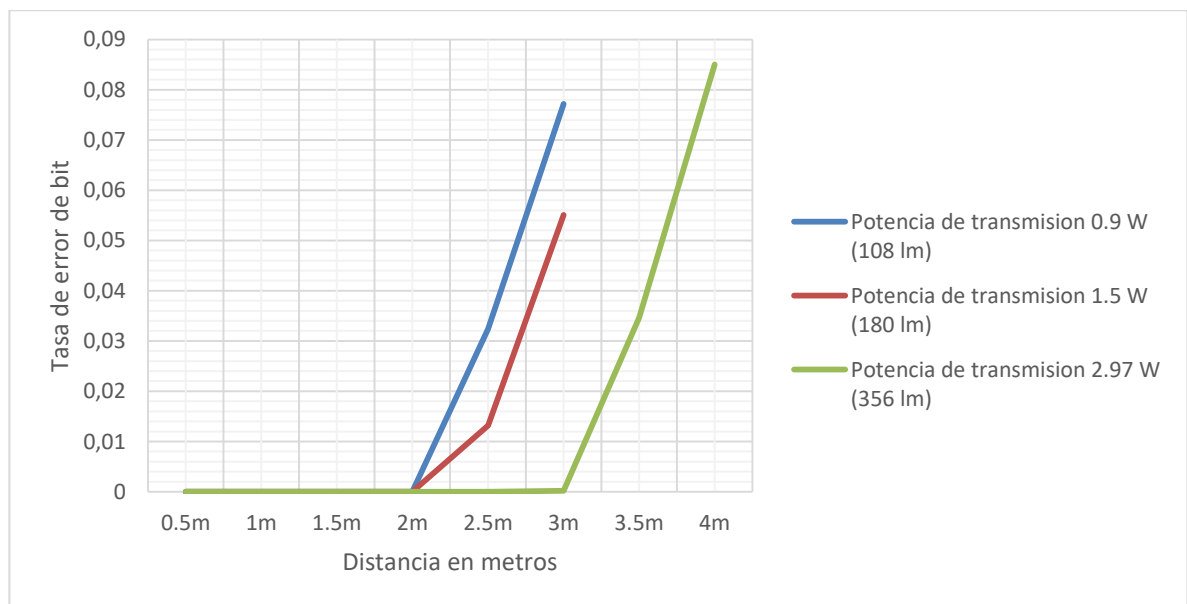
En la figura 4.3 se evidencia que el aumento de la potencia de transmisión lleva a un aumento significativo de la distancia máxima de separación entre los módulos sin que se tenga una tasa de error mayor a 0 %.

Para este modo de operación (*simplex*), la máxima distancia alcanzada sin errores es de 3 metros, esto sucede cuando la potencia de transmisión es de 2,97 W, es decir un flujo luminoso de 356 lm.

Al tener una potencia de transmisión del 1.5 W con 180 lm de flujo luminoso, se puede tener una distancia máxima de 2 m sin errores o de 2.5 m con una tasa de error de bit de 0.86 %.

Cuando la potencia de transmisión es de 0.9 W, en el modo de operación *simplex*, se logra una máxima distancia de 2 m con 0% de tasa de error de bit.

**Figura 4.4. Tasa de error de bit para distintas potencias de transmisión en modo *half-duplex*.**



**Elaboración propia.**

Al igual que en el modo *simplex*, en la figura 4.4 se evidencia que, para el modo *half-duplex*, el aumento de la potencia de transmisión conlleva a un aumento de la distancia máxima alcanzable sin errores.

Para este caso se logra una distancia máxima de 3 metros con una tasa de error de bit del 0,018 %, esto con una potencia de transmisión de 2,97 W, lo cual representa que 3 bits llegaron erróneos de los 16400 enviados.

Cuando la potencia de transmisión es de 1.5 W, la máxima distancia alcanzable es de 2.5 metros con una tasa de error de bit del 1.3 %.



**Tabla 9. Tasa de error de bit en la prueba de distancia vs potencia de transmisión.**

		<b>0.9 W</b>	<b>1.5 W</b>	<b>2.97 W</b>
<b>Half-duplex</b>	<b>0.5m</b>	0	0	0
	<b>1m</b>	0	0	0
	<b>1.5m</b>	0	0	0
	<b>2m</b>	0	0	0
	<b>2.5m</b>	0,032439024	0,01317073	0
	<b>3m</b>	0,077195122	0,05506098	0,00018293
	<b>3.5m</b>		0,18804878	0,03463415
	<b>4m</b>			0,085
<b>Simplex</b>	<b>0.5m</b>	0	0	0
	<b>1m</b>	0	0	0
	<b>1.5m</b>	0	0	0
	<b>2m</b>	0	0	0
	<b>2.5m</b>	0,035365854	0,00865854	0
	<b>3m</b>	0,080426829	0,05640244	0
	<b>3.5m</b>		0,22378049	0,02780488
	<b>4m</b>			0,05597561
<b>Elaboración propia</b>				

Estudiando los valores consignados en la tabla 8 que presenta los niveles de iluminación percibidos por el fotodiodo y teniendo en cuenta las tasas de error de bit consignadas en la tabla 9, puede decirse entonces que, para unos niveles de iluminación cercanos a 175 lx, los módulos VLC implementados puede responder de manera correcta, teniendo unas tasas de error de bit del 0 %. Esto también demuestra que el aumento de potencia de transmisión supone un aumento en la máxima de distancia de separación entre los módulos, debido a la relación directa entre la potencia de los LED y su flujo luminoso.

#### **4.4 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA SINLENTE ÓPTICO EN LA TRANSMISIÓN**

Al realizar una prueba de transmisión en el modo simplex, sin lente óptico, se tuvo un comportamiento bastante inferior al de las pruebas en las que se usó el lente, la distancia máxima de separación lograda sin error disminuyó considerablemente.

Para una distancia de 0.5 metros de separación, la tasa de error de bit fue del 51 %, tasa que indica que no existe comunicación, cabe resaltar que para esta distancia no llegaron todos los bits enviados, solo llegaron 5.728 bits, bajo este número de bits se calculó la tasa de error para esta distancia; al aumentar la distancia otros 0.5 metros, la etapa de recepción no respondió de ninguna manera, lo cual indica que no es suficiente el nivel de iluminación percibido por el módulo,

por lo tanto se optó por aumentar la distancia en intervalos de 0.1 metros, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 10.

**Tabla 10. Tasas de error de bit obtenidas sin usar el lente óptico de los LED.**

<b>Distancia de separación entre los módulos</b>	0.1 m	0.2 m	0.3 m	0.4 m	0.5 m
<b>Tasa de error de bit obtenida</b>	0	0	0,1491	0,2808	0,5125
<b>Elaboración propia</b>					

Como se presenta en la tabla 10, la máxima distancia de separación entre los módulos VLC desarrollados, disminuye considerablemente cuando no se utiliza lente óptico en los LED usados para transmitir. Esta disminución del alcance del prototipo se debe a la forma como se dispersa la luz de los LED al no usar lente óptico, esto puesto que su ángulo de radiación se eleva a 130°, haciendo así que los niveles de iluminación percibidos a las distancias relacionadas en la tabla sean los siguientes: 747,5 lx, 186,88 lx, 83 lx, 46,72 lx y 29,90 lx, empezando con 0.1 m y terminando con una separación de 0.5 m.

#### **4.5 PROTOTIPO DESARROLLADO Y SU RELACIÓN CON EL ESTÁNDAR IEEE 802.15.7**

El grupo de trabajo de la IEEE que se encarga de las comunicaciones basadas en luz visible presentó un estándar que muestra algunas recomendaciones de capa física y de enlace de datos para el diseño de sistemas VLC, entre estas recomendaciones son mencionados dos parámetros, que son, alcance de los dispositivos y tasa de transmisión.

En el estándar no se especifican distancias en metros de manera explícita como alcances de los dispositivos propuestos para las comunicaciones basadas en luz visible; dichos alcances son mencionados y relacionados con ejemplos de trabajos anteriores en el área, por el tutorial de la tecnología VLC, presentado por el mismo grupo de tarea de la IEEE en [2].

Las tasas de transmisión propuestas para cada una de las capas físicas y sus métodos de modulación y codificación sí son presentados en el estándar IEEE802.15.7. Para realizar una comparación de este parámetro con el alcanzado por el prototipo desarrollado, se tomaron en cuenta únicamente las tasas de transmisión propuestas para el método OOK con codificación Manchester

**4.5.1 Distancia alcanzada por el prototipo desarrollado, comparación con lo relacionado por el grupo de tarea IEEE 802.15.7.** Como se mencionó en la sección 1.3 del capítulo 1, el estándar IEEE 802.15.7 propone tres clases de

dispositivos para los sistemas VLC en aplicaciones de interiores y exteriores, estos son: infraestructura, móviles y vehículos.

Según lo encontrado en el tutorial de VLC y el propio estándar de la IEEE [2], [4], el rango de alcance para cada uno de los dispositivos propuestos se describe de la siguiente manera: móviles, de corto alcance, aproximadamente 1 metro, infraestructura, puede ser corto o medio alcance, aproximadamente entre 1 y 3 metros, por último, vehículos, en estos el alcance es largo, mayor a 3 metros.

**Tabla 11. Comparación de la máxima distancia alcanzable por el prototipo desarrollado y lo propuesto por el estándar IEEE 802.15.7**

Distancia máxima alcanzada por el prototipo desarrollado	Dispositivos móviles	Infraestructura	Comunicación vehicular
3 metros	~ 1 metro	~ 3 metros	~ más de 3 metros
	Alcanzable por el prototipo	Alcanzable por el prototipo	No alcanzable por el prototipo
Elaboración propia			

La tabla 11 presenta una comparación del parámetro de distancia alcanzado por el prototipo desarrollado y los alcances propuestos por el estándar IEEE 802.15.7. Se muestra qué alcances podría tener el prototipo dentro de los tres dispositivos propuestos por el estándar; en este caso, se logra alcanzar las distancias de dispositivos móviles y de infraestructura, es decir, dispositivos fijos de iluminación. También se muestra que no es posible alcanzar las distancias necesarias para comunicación entre vehículos, esta limitación posiblemente pueda superarse con un aumento de la potencia de la fuente de luz usada como transmisor, puesto que, como se encontró en la sección 4.3, el aumento de la potencia de transmisión conlleva a un aumento en la distancia máxima entre emisor y receptor.

**4.5.2 Comparación de las tasas de transmisión alcanzadas por el prototipo desarrollado y lo propuesto en el estándar IEEE 802.15.7.** Las tasas de transmisión propuestas por el estándar para el método de modulación OOK con codificación Manchester y su comparación con las alcanzadas por el prototipo desarrollado en ambos modos de funcionamiento, *simplex* y *half-duplex* se presentan en la tabla 12.

**Tabla 12. Comparación de las tasas de transmisión alcanzadas por el prototipo desarrollado y las propuestas por el estándar IEEE 802.15.7**

<b>Tasa de transmisión propuesta por el estándar IEEE 802.15.7</b>	<b>Modo <i>simplex</i> del prototipo desarrollado (Máximo 50 kbit/s)</b>	<b>Modo <i>half-duplex</i> del prototipo desarrollado (Máximo 23 kbit/s)</b>
11,67 kbit/s	Alcanzable	Alcanzable
24,44 kbit/s	Alcanzable	No Alcanzable
48,89 kbit/s	Alcanzable	No Alcanzable
73,3 kbit/s	No Alcanzable	No Alcanzable
100 kbit/s	No Alcanzable	No Alcanzable
<b>Elaboración propia</b>		

Tal como se presenta en la tabla 12, el prototipo desarrollado logra alcanzar 3 de las tasas de transmisión propuestas por el estándar en el modo *simplex*; para el modo *half-duplex*, tan solo fue posible alcanzar una de ellas, la cual corresponde a la más baja.

Las bajas tasas de transmisión alcanzadas por el prototipo desarrollado corresponden a la limitación impuesta por el tiempo de respuesta del fotodiodo usado en la etapa de recepción de los módulos, el cual no responde de acuerdo a lo descrito en su hoja de datos, tal como se muestra en la figura 2.6 de la sección 2.3.2; al cambiar el dispositivo de recepción por uno de mejor desempeño temporal, es posible mejorar la tasa de transmisión.

## **5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO**

A continuación, se presentan las conclusiones a las que se llegó a lo largo del desarrollo del prototipo implementado, así como los posibles trabajos futuros que podrían realizarse a partir de lo encontrado y descrito en este documento.

### **5.1 CONCLUSIONES**

Se diseñó e implementó el prototipo de un sistema de comunicación basado en luz visible capaz de transmitir datos en dos modos de funcionamiento, simplex y half-duplex, con unas tasas de transmisión máximas de 50 kbit/s y 23 kbit/s respectivamente. Con el prototipo se logró una distancia máxima de comunicación de tres metros, con una tasa de error de bit igual al 0%.

Se encontró que las variables que influyen de manera fundamental en el comportamiento del sistema VLC implementado son: la distancia de separación entre módulos, el flujo luminoso generado por la fuente de luz usada como transmisor así como su patrón de radiación, el tiempo de respuesta del elemento usado para detección y el ángulo de visión del mismo; esto debido a que cambios en las variables mencionadas pueden generar cambios en la tasa de error de bit alcanzada por el prototipo de manera significativa.

Al analizar los elementos que hacen parte del prototipo desarrollado se encontró que los que juegan un papel fundamental en su comportamiento son: la fuente de luz usada como transmisor, los lentes ópticos que se puedan acoplar a ésta, el detector usado para recibir los datos y el sistema de procesamiento que se use para la decodificación y codificación de los mismos, estos son los elementos principales del prototipo desarrollado debido a que sus parámetros de funcionamiento determinan características del sistema de comunicación implementado, tales como: tasa de transmisión máxima, distancia máxima y tasa de error de bit.

Se encontró que, sin importar la tasa de transmisión a la que operen los módulos VLC del prototipo desarrollado, la máxima distancia alcanzable entre estos no se ve afectada, es decir que menores tasas de transmisión no hacen que la máxima distancia de separación entre los módulos aumente, ni que mayores tasas de transmisión hacen que ésta disminuya, lo anterior sucede porque el tiempo de respuesta del fotodiodo usado para la recepción de los datos no se ve afectado por los cambios de distancia entre emisor y receptor, siempre y cuando se mantenga dicha distancia dentro del rango máximo alcanzable según el flujo luminoso.

El estudio de los cambios de niveles de iluminación ambiente en la habitación donde se probó el prototipo mostró que estos no tienen un efecto considerable en su funcionamiento, debido al diseño de la etapa de recepción, la disposición de los detectores en el espacio de prueba y el ángulo de visión de los mismos.

Se comprobó que el efecto de los tiempos de respuesta del fotodiodo utilizado en las etapas de recepción del prototipo desarrollado son el principal limitante a la hora de aumentar la tasa de transmisión, lo anterior sucede puesto que, al elevar la frecuencia de conmutación óptica en el transmisor, el fotodiodo no es capaz de replicar de manera adecuada la señal transmitida, generando así una mayor cantidad de errores en el momento de realizar la decodificación de los datos.

Se estudió el comportamiento del prototipo desarrollado bajo el uso de lentes ópticos para la fuente de luz y sin estos, logrando comprobar así, que es posible alcanzar mayores distancias de separación entre los módulos cuando la dispersión de la luz es reducida mediante un lente óptico.

Al comparar la tasa de transmisión alcanzable por el prototipo desarrollado y las propuestas por el estándar IEEE 802.15.7 se encontró que el sistema implementado no alcanza todas las mencionadas por el estándar, esto debido a las limitaciones de hardware encontradas, pero, aun así, alcanza algunas de las tasas de transmisión relacionadas, lo que lo hace un prototipo funcional y viable para el uso como acercamiento a la tecnología VLC.

El prototipo implementado logró alcanzar una distancia máxima de separación entre módulos de tres metros, lo cual, al compararse con los dispositivos propuestos por el estándar IEEE 802.15.7, muestra que el sistema desarrollado es capaz de funcionar a distancias o alcances para móviles e infraestructura que son dos de los tres dispositivos mencionados por el estándar. El rango de alcance del tercer tipo de dispositivos, el cual es vehículos, no pudo ser alcanzado, pero se mostró que es posible que, con un cambio en la fuente de luz utilizada, dicho alcance sea logrado.

## **5.2 TRABAJOS FUTUROS**

Con el objetivo de continuar con una investigación más profunda acerca de la tecnología de comunicaciones basadas en luz visible se proponen los siguientes trabajos futuros:

Como una propuesta de trabajo futuro se sugiere la realización de un nuevo prototipo basado en un sistema de procesamiento tipo FPGA, los cuales pueden trabajar a frecuencias más altas que las del microcontrolador usado, del orden de los 100 MHz; además de esto, muchas de las FPGA vienen integradas en kits de desarrollo que incluyen muchos periféricos y puertos de conexiones, como lo son, acceso a memorias externas tipo SD, conexión Wifi, conexión ethernet, conexión VGA. Este tipo de periféricos podría abrir las puertas a nuevas aplicaciones para un sistema de comunicaciones basado en luz visible. En esta propuesta se puede pensar también en el uso de un fotodiodo más veloz, el cual permita alcanzar tasas de transmisión más elevadas.

Otra propuesta de trabajo interesante derivada del prototipo desarrollado es la de probar los dos métodos de codificación y modulación restantes que se presentan

en el estándar de la IEEE 802.15.7 y compararlos con lo obtenido en este trabajo de grado.

La siguiente propuesta de trabajo es la de construir 3 o más de los módulos VLC desarrollados con el objetivo de probar el funcionamiento en conjunto de una red de comunicaciones basada en luz visible y tener así un acercamiento al control de acceso al medio en esta tecnología.

Por último, se propone el uso de los módulos VLC desarrollados para la creación de un sistema de posicionamiento basado en luz visible, en el cual se utilizaría el modo *simplex* (broadcast) y las luminarias deberían estar fijas en un punto dentro de una habitación, se requeriría de unos receptores capaces de decodificar los mensajes y, según estos, identificar el lugar en el que se encuentran dentro de una habitación.

## REFERENCIAS

- [1] M. Uysal and H. Nouri, "Optical wireless communications — An emerging technology," *2014 16th Int. Conf. Transparent Opt. Networks*, pp. 1–7, 2014.
- [2] I. IEEE 802.15 Task group 7, "Visible Light Communication: Tutorial," *Tutorial*, 2008. [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html>.
- [3] A. Wilkins, J. Veitch, and B. Lehman, "LED Lighting Flicker and Potential Health Concerns : IEEE Standard PAR1789 Update," pp. 171–178, 2010.
- [4] I. Standard and I. C. Society, *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks — Part 15 . 4 : Low-Rate Wireless Personal Area Networks ( LR-WPANs ) IEEE Computer Society S ponsored by the*, vol. 2011, no. September. 2011.
- [5] M. P. García Sanz, "Iluminación en el puesto de trabajo. criterios para su evaluación y acondicionamiento," *Inst. Nac. Secur. e Hig. en el Trab. Minist. Empl. y Secur. Soc. España*, pp. 1–39.
- [6] G. Babak M., M. Mehdi D., and S. Jawad A., *Advanced Optical Wireless Communication Systems*. Cambridge University Press, 2012.
- [7] A. Pradana, N. Ahmadi, T. Adiono, W. A. Cahyadi, and Y. H. Chung, "VLC physical layer design based on Pulse Position Modulation (PPM) for stable illumination," *2015 Int. Symp. Intell. Signal Process. Commun. Syst. ISPACS 2015*, pp. 368–373, 2016.
- [8] A. Ali, A. Sehar, S. Najaf, and H. M. Asif, "Customizable Transceiver Design of a Visible Light Communication System," *2015 13th Int. Conf. Front. Inf. Technol.*, pp. 138–143, 2015.
- [9] A. Shlomi, *Visible Light Communication*. Cambridge University Press, 2015.
- [10] E. Monteiro and S. Hranilovic, "Design and Implementation of Color-Shift Keying for Visible Light Communications," *J. Light. Technol.*, vol. 32, no. 10, pp. 2053–2060, 2014.
- [11] S. Dimitrov and H. Haas, *Principles of LED light communications*. 2015.
- [12] M. Uysal, F. Miramirkhani, O. Narmanlioglu, T. Baykas, and E. Panayirci, "IEEE 802.15.7r1 Reference Channel Models for Visible Light Communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 1, pp. 212–217, 2017.
- [13] F. Khan, S. R. Jan, M. Tahir, and S. Khan, "Applications, limitations, and improvements in visible light communication systems," *2015 Int. Conf. Connect. Veh. Expo*, pp. 259–262, 2015.
- [14] H. Burchardt, N. Serafimovski, D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, "VLC: Beyond point-to-point communication," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 7, pp. 98–105, 2014.



- [15] A. Tsiatmas, C. P. M. J. Baggen, F. M. J. Willems, J. P. M. G. Linnartz, and J. W. M. Bergmans, "An illumination perspective on visible light communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 7, pp. 64–71, 2014.
- [16] J. Gancarz, H. Elgala, and T. D. C. Little, "Impact of lighting requirements on VLC systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 12, pp. 34–41, 2013.
- [17] C. Gong, S. Li, Q. Gao, and Z. Xu, "Visible Light Communication Optimization under Lighting Constraints," vol. 2, pp. 159–160, 2015.
- [18] M. S. Gujar, "Realtime Audio Streaming using Visible Light," in *International Conference on inventive Computation Technologies (ICICT)*, 2016.
- [19] L. Wu, Z. Zhang, J. Dang, and H. Liu, "Light Communications," vol. 33, no. 1, pp. 117–125, 2015.
- [20] C. Wang, Z. Zhang, M. Zhang, and H. Zhu, "Visible light communication application scenarios based on Android smart devices' LED lamp," *Photonic Netw. Commun.*, vol. 32, no. 2, pp. 174–178, 2016.
- [21] W. Feng and X. Chen, "LED Visible light communication system based on FPGA," in *Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, 2015.
- [22] P. Chernatanomwong and W. Chantharasena, "Indoor Localisation System Using Visible Light Communication," *7th Int. Conf. Inf. Technol. Electr. Eng.*, pp. 480–483, 2015.
- [23] S. H. Yu, O. Shih, H. M. Tsai, and R. D. Roberts, "Smart automotive lighting for vehicle safety," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 12, pp. 50–59, 2013.
- [24] U. internacional de Telecomunicaciones, "Recomendación UIT-T O.150 (05/96)," vol. O.150. UIT, p. 4, 1996.

**ANEXO A**  
**Tabla de codificación 4B6B**

La tabla presentada a continuación presenta la manera en que se relacionan los datos de entrada y salida en la codificación 4B6B.

<b>Dato de entrada (4B)</b>	<b>Dato de salida (6B)</b>
0000	001110
0001	001101
0010	010011
0011	010110
0100	010101
0101	100011
0110	100110
0111	100101
1000	011001
1001	011010
1010	011100
1011	110001
1100	110010
1101	101001
1110	101010
1111	101100